

Verbesserung der Prozessfähigkeit beim Spritzgießen durch Nutzung von Prozessdaten und eine neuartige Schneckenhubführung

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau der
Universität Duisburg-Essen
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Reinhard Schiffers

aus

Geilenkirchen

Referent: Prof. Dr.-Ing. Johannes Wortberg
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Walter Michaeli

Tag der mündlichen Prüfung: 06.07.2009

Wer immer tut, was er schon kann, bleibt immer das, was er schon ist.

Henry Ford

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Institut für Produkt Engineering am Lehrstuhl für Konstruktion und Kunststoffmaschinen IPE-KKM der Universität Duisburg-Essen in den Jahren 2004 bis 2008.

Dem Inhaber des Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Wortberg, möchte ich herzlichst für die wertvollen Anregungen zu dieser Arbeit und die jederzeit gewährte Unterstützung bei der Durchführung danken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. W. Michaeli danke ich für die Übernahme des Korreferats und die kritische Durchsicht der Arbeit. Mein Dank gilt weiterhin dem Vorsitzenden der Prüfungskommission, Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Kecskeméthy, sowie den Mitprüfern, Herrn Prof. Dr. R. Leisten und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. G. Witt.

Mein besonderer Dank gilt außerdem allen wissenschaftlichen und technischen Mitarbeitern des Instituts, den Studien- und Diplomarbeitern sowie den zahlreichen studentischen Hilfskräften, die durch ihr tatkräftiges Mitwirken diese Arbeit ermöglicht haben. Ein besonderer Dank geht dabei an Christoph, Christoph, Frank und Dirk.

Meinem langjährigen Bürokollegen Herrn Dr.-Ing. Hassan Rahal danke ich für die anregenden Gespräche und die schöne Zeit. Weiterhin möchte ich besonders Herrn Dipl.-Ing. Marcel Grossmann sowie Herrn Dipl.-Ing. Jens Dörner für die kritische Durchsicht meiner Arbeit danken.

Für die gewährte Unterstützung bei der maschinen- und labortechnischen Ausstattung sowie die großzügige Bereitstellung von Versuchsmaterialien bin ich den Folgenden Firmen sehr verbunden: Engel Austria GmbH (Schwertberg), Ferromatik Milacron Maschinenbau GmbH (Malterdingen), ARBURG GmbH + Co KG (Lossburg), Bayer Material-Science AG (Krefeld-Uerdingen), Lanxess Deutschland GmbH (Dormagen), Evonik Degussa GmbH (Marl).

München, im Juli 2009

Reinhard Schiffers

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Stand der Forschung und Technik.....	4
2.1	Regelung von Maschineneinstellparametern	6
2.2	Regelung direkt qualitätsbestimmender Parameter	7
2.2.1	Massetemperaturregelung.....	7
2.2.2	Dosierwegregelung.....	8
2.2.3	Werkzeuginnendruckregelung	8
2.2.4	Regelung des Umschaltpunktes	11
2.3	Regelung von aggregierten Prozesskennzahlen.....	12
2.3.1	Integrale Temperaturerhöhung	12
2.3.2	Regelung der Einspritzarbeit / Fließzahlregelung	13
2.3.3	Werkzeuginnendruckintegralregelung	14
2.4	Qualitätsregelung durch eine Rückführung der Produktqualität	15
2.5	Prognosebasierte Qualitätsregelung	15
2.5.1	Modellierung über physikalische Modelle	16
2.5.2	Modellierung über statistische Modelle.....	16
2.6	Zustandsregelungen	17
2.7	Prozessführung in der Einspritz- und Nachdruckphase	18
3	Nutzung von Prozesswissen zur Steigerung der Prozessfähigkeit.....	19
3.1	Versuchsbedingungen und Versuchsablauf.....	21
3.1.1	Spritzgießmaschine	21
3.1.2	Versuchswerkzeuge	21
3.1.3	Messtechnischer Aufbau	22
3.1.4	Versuchsdurchführung.....	25
3.2	Energie- und Arbeitsparameter an elektromechanischen Spritzgießmaschinen ...	27
3.2.1	Energie/Arbeitsparameter der Zylindertemperierung	27
3.2.2	Arbeitsparameter des Einspritzantriebsstrangs	30
3.2.3	Arbeitsparameter des Plastifizierantriebstranges.....	36
3.2.4	Arbeitsparameter aus der Druck- und Kraftmessung.....	39
3.2.5	Integrale Prozessparameter der Einspritzeinheit und des Werkzeuges.....	42
3.3	Automatisierte Trendüberwachung mit Prozessdaten.....	49
3.4	Aussagekraft der Prozessparameter zur Prozesscharakterisierung.....	52
3.4.1	Arbeitsparameter	53
3.4.2	Integralparameter	56
3.4.3	Mittelwertparameter	58

3.5	Prozessregelung mit Arbeits-Energieparametern.....	61
3.5.1	Versuchsreihe mit Polybutylenterephthalat I.....	63
3.5.2	Versuchsreihe mit Polybutylenterephthalat II.....	70
4	Alternative Ansätze zur Prozessführung an Spritzgießmaschinen	74
4.1	Standardprozess und Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Einspritzvorgang	75
4.2	Reproduzierbarkeit der Schneckenbewegung.....	78
4.3	Prozesskonstanz mit Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Formfüllung.....	83
4.4	Verhalten von Weg-Geschwindigkeitsgeregelter- und Standardprozess beim Auftreten von rohstoffinduzierten Prozessstörungen.....	85
4.4.1	Standard- und Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Prozess (HDPE)	85
4.4.2	Standard- und Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Prozess (PBT)	87
4.5	Steigerung der Prozesskonstanz bei Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Einspritzhub durch eine aktive Anpassung des Einspritzprofils	91
4.5.1	Sensorisches Erkennen des Schließzeitpunktes der Rückströmsperre.....	94
4.5.2	Prognosemodellbasiertes Anpassen des Weg-Geschwindigkeitsprofils.....	97
5	Fazit, Ausblick und Potenziale.....	100
6	Zusammenfassung.....	102
7	Summary	103
8	Literaturverzeichnis	106
9	Anhang.....	114
9.1	Versuchsmaterialien.....	114
9.2	Formfüllstudie Farbmusterplatte.....	117
9.3	Zusammenhang von Einspritzprofilverschiebung und Formteilgewicht.....	118
9.4	Diagramme zur Reproduzierbarkeit der Schneckenbewegung	119
9.5	Verwendete Prozessparameter.....	122
9.6	Zeichnungen der verwendeten Versuchswerkzeuge.....	125

Verzeichnis der verwendeten Symbole und Abkürzungen

Symbolverzeichnis

A_K	[cm ³]	Schneckenkolbenfläche
Δs	[mm]	zurückgelegter Schneckenweg
$\Delta \bar{y}$	[-]	Abweichung des Mittelwertes
EA_{KMD}	[Ws]	Einspritzarbeit auf Basis des Kraftmesswertes
EA_{Motor}	[Ws]	Einspritzarbeit auf Basis des Motormomentes
FA_{KMD}	[Ws]	Füllarbeit auf Basis des Kraftmesswertes
FA_{Motor}	[Ws]	Füllarbeit auf Basis des Motormomentes
FZ_{KMD}	[bar·s]	Fließzahl auf Basis des Kraftmesswertes
F_{KMD}	[N]	Kraftmesswert der Messzelle am Schneckenschaft
I_{Zi}	[A]	Stromfluss Zylinderheizung Zone i
I_E^{Wi}	[bar·s]	Werkzeuginnendruckintegral der Einspritzphase
I_N^{Wi}	[bar·s]	Werkzeuginnendruckintegral der Nachdruckphase
I_E^{Fu}	[Nm·s]	Drehmomentintegral Einspritzen
M_E	[Nm]	Motordrehmoment der Einspritzachse
M_P	[Nm]	Motordrehmoment der Plastifizierachse
n	[1/s]	Drehzahl
NA_{KMD}	[Ws]	Nachdruckarbeit auf Basis des Kraftmesswertes
NA_{Motor}	[Ws]	Nachdruckarbeit auf Basis des Motormomentes
p	[bar]	Druck
PA_{Motor}^I	[Ws]	Plastifizierarbeit
PA_{Motor}^{II}	[Ws]	Plastifizierarbeit 2
P_{Zi}	[W]	Heizleistung Zylinderheizung Zone i
S	[-]	Standardabweichung
SA_{Motor}	[Ws]	Staudruckarbeit auf Basis des Motormomentes
S / G	[-]	Signal / Geräusch Verhältnis
t	[s]	Zeit
U_V	[V]	Versorgungsspannung
v	[mm/s]	Einspritzgeschwindigkeit

W_{zi}	[Ws]	Heizarbeit Zylinderheizung Zone i
W_E	[bar·s]	Einspritzarbeit
W_i	[bar·s]	Werkzeuginnendruckintegral
\bar{x}	[-]	arithmetischer Mittelwert
X_{rel}	[-]	relative Änderung eines Parameter

Abkürzungen

B	Bestimmtheitsmaß
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CNC	Computer Numeric Control
Cq	Prognosegüte
Cqk	kritische Prognosegüte
CSV	Comma Separated Values
F&E	Forschung und Entwicklung
Fu	Frequenzumrichter
HDPE	High Density Polyethylene
KMD	Kraftmessdose zur Spritzdruckmessung am Schneckenschaft
KMZ	Kraftmesszelle zur Spritzdruckmessung am Schneckenschaft
MFI	Melt Flow Index
PA	Polyamid
PA6	Polyamid 6
PBT	Polybutylenterephthalat
PE	Polyethylen
PPS	Polymer Processing Society
SGM	Spritzgießmaschine
VDMA	Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbauer

1 Einleitung und Zielsetzung

Das Urformverfahren Spritzgießen dient der vollautomatischen Herstellung von Formteilen komplexer Geometrien. Spritzgegossene Bauteile sind in allen Bereichen des täglichen Lebens und der Technik im Einsatz. Etwa 60% aller Kunststoffverarbeitungsmaschinen sind Spritzgießmaschinen, mit denen in Deutschland ca. 25% des Gesamtverbrauchs an Kunststoffen verarbeitet wird [StKe01]. Die Spritzgießtechnologie bietet dem Konstrukteur große Freiräume bezüglich der Gestaltung des Formteils und der Möglichkeit, Funktionalitäten direkt zu integrieren. Die große Anzahl der Sonderverfahren im Spritzgießen wie z.B. Gas- und Wasserinjektionstechnik (GIT, WIT), Mehrkomponentenverfahren (2K, 3K usw.), Inmould-Labeling (IML), Spritzprägen, um einige zu nennen, bieten zudem noch weitere Freiheitsgrade in der Produktgestaltung [JoMi02].

Durch die große Verfügbarkeit von qualitativ hochwertigen Kunststoffmaschinen am Markt sowie durch die Globalisierung ist eine weltweite Konkurrenzsituation in der Kunststoffbranche entstanden. Dies betrifft zum einen die kunststoffverarbeitenden Betriebe, die sich der Konkurrenz aus sogenannten „Niedriglohnländern“ stellen müssen, aber auch die Maschinenhersteller, die ihre Technologieführerschaft sicherstellen und damit ihre Marktposition behaupten wollen. Um in dieser Wettbewerbssituation auch in Zukunft bestehen zu können, muss die Verfahrens- und Maschinenteknik konsequent weiter entwickelt werden.

Ein Hauptziel der aktuellen Entwicklungen ist die Verbesserung der mit den Maschinen erreichbaren Prozessfähigkeiten. Moderne Spritzgießmaschinen sind in der Lage die Abweichungen in den Fahrbewegungen der Achsen sehr gering zu halten. Dieses gilt insbesondere für elektromechanisch angetriebene Spritzgießmaschinen, die im Allgemeinen höhere Langzeitprozessfähigkeiten erreichen [WKS03]. Geht man davon aus, dass z.B. die Einspritzachse einer Spritzgießmaschine absolut wiederholgenau arbeitet, ist dies jedoch noch keine Garantie für eine konstante und fehlerfreie Produktion. Immer wieder werden über den verarbeiteten Rohstoff Störungen im Prozess eingebracht. Abweichungen in der Qualität des verarbeiteten Granulates stören den Verarbeitungsprozess häufig derart, dass eine Nachführung der Maschineneinstellung notwendig wird, um ein bestimmtes Qualitätsniveau zu halten [BW07, Wo89b, Ma91].

Diese Störeinflüsse können verschiedenen Ursprunges sein, die häufigsten Gründe sind:

- Chargenbedingte Abweichungen der Verarbeitungseigenschaften
- Schwankungen des Restfeuchtegehaltes im Granulat
- Wechselnde Anteile von regranuliertem Granulat

Eine Möglichkeit, diesen Störungen entgegen zu wirken ist der Betrieb der Anlagen an einem robusten Betriebspunkt, welcher in einem statistischen Versuchsplan ermittelt wird [Bo94]. Wird die Spritzgießmaschine in diesem Betriebspunkt betrieben, werden die auf

sie einwirkenden Störungen möglichst gedämpft und haben nur geringen Einfluss auf die ausschlaggebenden Qualitätsmerkmale [BE94, Bo94]. Dieser Betriebspunkt ist jeweils abhängig von Maschine, Werkzeug und dem verarbeiteten Material. Weiterhin sind Einflüsse durch wechselnde Verschleißzustände der Anlagenkomponenten zu berücksichtigen.

Elektromechanische Spritzgießmaschinen verfügen heute in der Maschinensteuerung über eine Fülle an Informationen über den Prozesszustand [WS07, WSF08]. Ein Teil dieser Informationen wird zur Regelung der Maschinenfunktionen benötigt. Weiterhin sind noch Prozessinformationen wie z.B. die Heizleistung oder auch das Schneckendrehmoment in der Steuerung vorhanden. Diese werden nicht direkt für die Regelung der Maschine verwendet und dem Benutzer bisher lediglich in der Bedienoberfläche angezeigt. Eine systematische Auswertung dieser vorhandenen Informationen findet nicht statt. Ein Ansatz, speziell die in elektromechanischen Spritzgießmaschinen vorliegenden Prozessinformationen zu nutzen, ist die Betrachtung der Einspritzeinheit als Bilanzraum (siehe Abbildung 1-1). Dabei lassen sich leicht Stoff- und Energieströme abgrenzen, die die Systemgrenzen passieren. Der verarbeitete Kunststoff, der als Granulat in das System eintritt und es als Schmelze mit höherer Temperatur/Enthalpie wieder verlässt, ergibt die Massenbilanz. Darüber hinaus werden dem System verschiedene Energieströme zugeführt. Das sind zum einen die über die Zylinderheizelemente eingebrachte Heizenergie, zum anderen die durch die elektrischen Antriebe umgesetzten Energien.

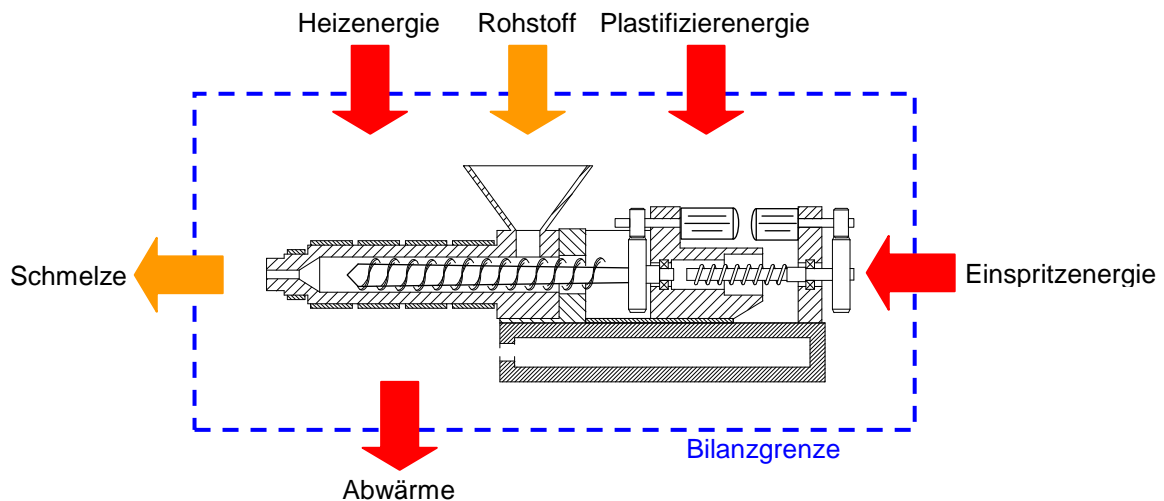


Abbildung 1-1: Energiebilanz einer elektromechanischen Spritzeinheit nach [WS07]

Die eingebrachten Energienanteile verlassen das System wieder mit der Schmelze sowie die verschiedenen Wärmeverlustleistungen. Bei elektromechanisch angetriebenen Spritzeinheiten lassen sich die Energieströme im Allgemeinen aus standardmäßig in der Maschinensteuerung vorhandenen Prozessdaten berechnen. Ziel dieser Arbeit ist es, die in elektromechanischen Spritzgießmaschinen vorliegenden Informationen durch die Berech-

nung von energiebilanzbezogenen Prozesskennzahlen zu aggregieren und so nutzbar zu machen.

Die Prozesskennzahlen basieren dabei maßgeblich auf den in den jeweiligen Prozessphasen in der Maschine umgesetzten Energien und Arbeiten. Sie werden in Form von Integral- oder Mittelwerten berechnet und sollen die Bewertung des aktuellen Prozesszustandes ermöglichen. Dazu werden im Einzelnen:

- -verschiedene energiebilanzbezogene Prozesskennzahlen definiert
- -diese werden auf ihre Eignung zur Prozesscharakterisierung hin untersucht
- -ein Ansatz zur Trendüberwachung des Spritzgießprozesses dargestellt
- -die Prozesskennzahlen in einer prognosebasierten Qualitätsregelung verwendet

Als weiterer Schwerpunkt dieser Arbeit werden alternative Ansätze zur Steuerung/Regelung des Einspritzhubs an Spritzgießmaschinen untersucht. Dabei werden Alternativen zu der durch die Möglichkeiten von elektrohydraulisch angetriebenen Einspritzachsen abgeleiteten Prozessführung dargestellt. Insbesondere wird erläutert wie sich eine rein über ein Weg-Geschwindigkeitsprofil gesteuerte Einspritzbewegung auf die Prozessrobustheit auswirkt. Gleichzeitig werden Möglichkeiten untersucht, die eine aktive Kompensation von wirkenden Prozessstörungen gestatten.

Ziel ist es zu beurteilen, inwiefern die Leistungsfähigkeit und Möglichkeiten von elektromechanischen Achsantrieben zur Verbesserung der Prozessrobustheit des Spritzgießprozesses sowie zur Realisierung einer alternativen Prozessführung eingesetzt werden können.

2 Stand der Forschung und Technik

Der Spritzgießprozess unterliegt verschiedensten Einflüssen, die über den Rohstoff, die Spritzgießmaschine selber sowie durch die Umgebung in den Prozess eingebracht werden. Abbildung 2-1 zeigt Einflussfaktoren auf die Formteilqualität in der Spritzgießproduktion. Neben der Spritzgießmaschine, die über die Höhe der erreichten Prozessparameterstreuungen im Betrieb charakterisiert wird, bestimmen noch weitere Einflussgrößen die produzierte Formteilqualität. Diese Störgrößen werden im betrieblichen Alltag nicht systematisch erfasst und können in vielen Fällen nicht abgestellt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit steht der Einfluss des verarbeiteten Rohstoffes im Mittelpunkt der Betrachtung. Der Spritzgießprozess reagiert sehr stark auf Änderungen im verarbeiteten Rohstoff. Zum einen beeinflussen die rheologischen und thermischen Eigenschaften direkt den Formteilbildungsprozess, zum andern haben die Eigenschaften Einfluss auf den Betriebszustand der Maschine. Das Schließverhalten von Rückströmsperren ist z.B. von der Viskosität des verarbeiteten Polymers abhängig [GBR01]. Schon geringe Abweichungen im Schließverhalten der Rückströmsperre können einen bedeutenden Einfluss auf die Formteilqualität haben.

Eine in der praktischen Anwendung häufig zitierte Störgröße in der Spritzgießproduktion sind Chargenschwankungen des Rohstoffes, deren Einfluss in einigen Fällen eine Parameteranpassung an der Spritzgießmaschine notwendig macht [BW07, Do03]. Größere Abweichungen zwischen verschiedenen Rohstoffchargen sind vor allem im Bereich der in Kleinmengen produzierten Materialien zu finden, doch auch bei Massenkunststoffen kommt es immer wieder zu Problemen.

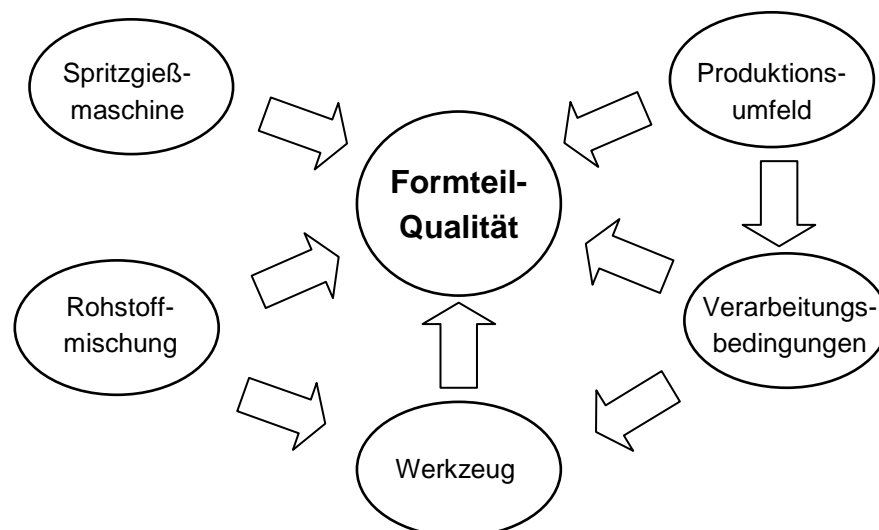


Abbildung 2-1: Einflüsse auf die Formteilqualität beim Spritzgießen nach [Wo96]

Sogar wenn der durch einen Materialhersteller gelieferte Rohstoff innerhalb der spezifizierten Toleranzen liegt, kann dieser bei kritischen Prozessen bereits qualitätsrelevante Auswirkungen auf den Prozess haben [BW07].

Ähnliches gilt auch bei der Verarbeitung von technischen Formmassen wie PA, POM, PBT, bei denen ein Trocknen des Rohstoffes vor der Verarbeitung erfolgen muss. Auch wenn die Restfeuchtigkeit des verarbeiteten Polymers innerhalb der vom Hersteller vorgegebenen Grenzen liegt, können variierende Restfeuchtigkeitsanteile zu unzulässigen Qualitätsabweichungen in der Produktion führen. Weiterhin kommt es im Materialhandling durch nicht optimale Prozesse, verursacht durch Maschinenstillstände oder unterschiedliche Eingangsfeuchten des Rohstoffes, zu Schwankungen in den Restfeuchtegehalten des Granulates [WoSc03]. Zum einen bewirken die wechselnden Wasseranteile einen unterschiedlich starken Weichmachungseffekt bei der Verarbeitung, zum anderen resultiert daraus ein mehr oder weniger starker hydrolytischer Abbau des Polymers. Im Besonderen betroffen sind Polymertypen, die in einer Polykondensationsreaktion unter Abspaltung von Wasser hergestellt werden. Die Esterreaktion ist reversibel und durch das in der Verarbeitung anwesende Wasser kommt es zu einem Abbau der Molekülketten. Dieser Effekt wird durch steigende Restfeuchtigkeiten sowie höhere Verarbeitungstemperaturen verstärkt.

Wird in der Produktion regranuliertes Material der Neuware (diskontinuierlich) beigemischt, so kann auch das zu abweichenden Verarbeitungseigenschaften führen. Das regranulierte Material hat im Vergleich zur Neuware zumeist eine abweichende Schüttdichte, was zu einem veränderten Einzugsverhalten führt. Weiterhin ist das Material durch die erste Verarbeitung thermisch/mechanisch vorbelastet. Ausschlaggebend ist hier der thermische Abbau, wobei durch das Einwirken der zur Verarbeitung notwendigen Temperaturen die kovalenten Bindungen in den Molekülketten aufgelöst werden. Die entstehenden Bruchstücke der Molekülketten sind im Vergleich zum Ursprungszustand instabiler und werden beschleunigt abgebaut. Weiterhin kommt es bei entsprechend hohen Fließgeschwindigkeiten durch die deformationsbedingte dissipative lokale Temperaturerhöhung zu einem zusätzlichen thermischen Abbau des Polymers.

Zu Beginn des Spritzgießmaschinenbaus heutiger Bauart mit Schneckenkolbeneinspritzung in den 1950er Jahren [Sc96] waren sämtliche Funktionen an den Maschinen rein gesteuert [JoMi02]. Der prinzipielle Ablauf einer rein gesteuerten Maschinenachse ist in Abbildung 2-2 a) am Beispiel der Einspritzachse dargestellt. Der eingestellte Sollwert für die Vorschubgeschwindigkeit wird an das Stellglied, hier im Hydraulikventil weitergegeben. Das Ventil nimmt eine Stellung ein und gibt einen Volumenstrom an den Hydraulik-Aktor der Einspritzachse frei. Eine Überprüfung der tatsächlich erreichten Vorschubgeschwindigkeit findet nicht statt. Änderungen im Gesamtsystem wie wechselnde Hydrauliköltemperaturen oder Eigenschaftsschwankungen des verarbeiteten Kunststoffes können zu Abweichungen zwischen Soll- und Istwerten führen. Um die Prozesskonstanz zu steigern und auch beim Wirken von Störungen gleichbleibende Bauteilqualitäten zu erzielen, werden geregelte Maschinenachsen eingesetzt.

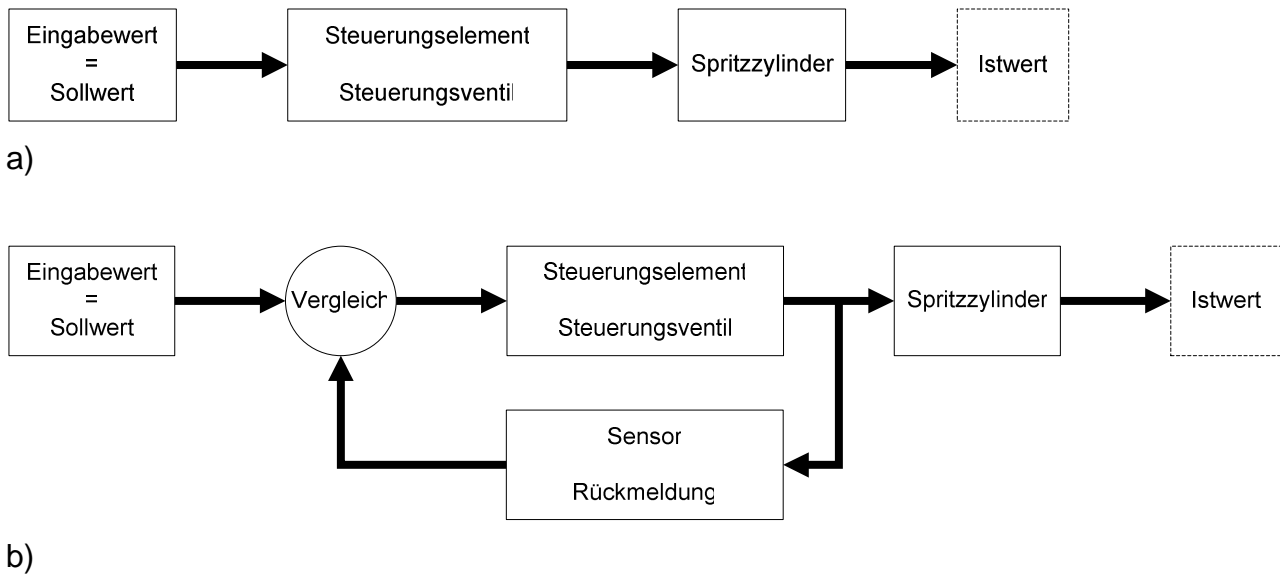


Abbildung 2-2: Prinzip einer Steuerung (a) oder Regelung (b) der Einspritzgeschwindigkeit an einer Spritzgießmaschine nach [Ar97]

Im direkten Vergleich mit einer Steuerung gibt es bei einer Regelung eine Rückmeldung des Istwertes der Regelgröße. Wie in Abbildung 2-2 b) dargestellt, wird der Istwert kontinuierlich gemessen und mit dem Sollwert verglichen. Bei Abweichungen vom Sollwert wird die Stellgröße kontinuierlich nachgeführt. Der maschinentechnische Aufwand ist dementsprechend höher, da zusätzliche Druck-, Positions- und Geschwindigkeitssensorik benötigt wird. Weiterhin steigen mit einer Regelung der Maschinenachsen auch die Anforderungen an die Stellglieder. Bei hydraulischen Achsen müssen so die Ventile in der Lage sein, die Stelleingriffe in der notwendigen Geschwindigkeit vorzunehmen, bei elektromechanisch angetriebenen Achsen müssen die untergelagerten Regelkreise der Antriebe entsprechend ausgelegt sein.

Obwohl aktuelle Spritzgießmaschinen höchste Reproduzierbarkeiten in den Achsbewegungen sowie der Regelung der Systemtemperaturen erreichen, kommt es durch Änderungen im Verarbeitungsverhalten des Rohstoffes weiterhin zu Qualitätsabweichungen. Um im Spritzgießprozess konstant qualitativ hochwertige Formteile zu produzieren, wurden in den letzten Jahrzehnten verschiedene Ansätze entwickelt, die im Folgenden dargestellt werden.

2.1 Regelung von Maschineneinstellparametern

Die ersten Regelkreise an Spritzgießmaschinen beschränkten sich zunächst auf die Regelung der Maschineneinstellparameter. Seit Mitte der 1950er Jahre werden die Zylinderzonentemperaturen am Einspritzzylinder von Spritzgießmaschinen über eine Rückführung geregelt. Ende der 1970er Jahre werden die ersten Spritzgießmaschinen mit lagegeregelten Achsen angeboten. Dabei bezieht sich die Lageregelung zu Beginn nur auf die Positi-

onsregelung der Einspritzachse. Hier kommt es, bedingt durch Faktoren wie schwankende Öltemperaturen und das dadurch veränderte Betriebsverhalten sowie durch abweichende Verarbeitungseigenschaften des Rohstoffs, bei rein gesteuerten Spritzgießmaschinen zu großen Abweichungen in der Formteilqualität. Zur Lageregelung der Maschinenachsen werden seit jeher neben einfachen PI-Reglern auch komplexere Regelungstechniken angewendet, die im Allgemeinen zu geringeren Regelabweichungen führen [NoFu98, MaRi07]. Auch die Weiterentwicklung der Rechner Technik hat stark dazu beigetragen, dass Systeme schneller und sicherer beherrschbar sind. In der Spritzgießtechnik hat die Überwachung und Regelung von Maschinenparametern so bereits früh eine wichtige verfahrenstechnische Bedeutung erlangt [Uj99].

Vollgeregelte Spritzgießmaschinen verfügen weiterhin über Regelungen der Werkzeug-, Auswerfer- und Aggregatbewegung [Ro86]. Der Einsatz von Regelkreisen in Spritzgießmaschinen hat gezeigt, dass hierdurch die Reproduzierbarkeit des Spritzgießzyklus gesteigert werden kann [Mu00]. Die Regelung von Maschinenparametern garantiert jedoch keine konstante Produktqualität. Werden Prozessstörgrößen wie zuvor beschrieben durch Veränderungen im zugeführten Material verursacht, so führen konstante Maschinenparameter nicht zu einer konstanten Produktqualität [Mu00, Uj99].

2.2 Regelung direkt qualitätsbestimmender Parameter

Die Regelung besonders prozessrelevanter Parameter stellt einen weiteren Schritt der Entwicklung zu einer Qualitätsregelung dar. Mit der Erkenntnis, dass konstante Maschinenparameter noch keine konstante Produktqualität liefern können, ging man dazu über Prozessgrößen zu regeln, die in direktem Zusammenhang mit den Gegebenheiten der Formteilkonstruktion stehen. Die wichtigsten Verfahren sind im Folgenden erörtert.

2.2.1 Massetemperaturregelung

Die Massetemperaturregelung verfolgt das Ziel einer gleichbleibenden Schmelztemperatur und somit einer über dem Produktionszeitraum konstanten Schmelzequalität. Unter der Voraussetzung konstanter Prozessbedingungen, die aufgrund der vorherigen Entwicklungen nun gut eingehalten werden konnten, soll über die konstante Schmelztemperatur eine gleichbleibende Produktqualität bei der Formteilkonstruktion erreicht werden. Durch Wahl von Stellgrößen wie der Schneckendrehzahl beim Plastifizieren, der Staudruckhöhe sowie der Zylinderwandtemperatur wird versucht, Temperaturschwankungen der Massetemperatur auszugleichen. Eine Änderung des Staudrucks oder der Schneckendrehzahl zeigt hier einen effektiveren Einfluss auf den Prozess [La87, La96, Se97, Ca05]. In [La87] ist nachgewiesen, dass durch gestufte Drehzahlprofile sowie durch dosierwegabhängige Staudrücke axiale Massetemperaturunterschiede minimiert werden können.

Das größte Problem bei dieser Art der Prozessregelung stellt die geringe Reaktionsgeschwindigkeit der standardmäßigen Temperaturmessung über Thermoelemente im Schneckenraum dar. Temperaturen konnten somit nur durch langsames Ausspritzen

der Schmelze erfasst werden, wodurch sich diese Verfahren lediglich für Voroptimierungen, jedoch nicht für eine Online-Erfassung während des Spritzgießprozesses eignen [Uj99]. Eine dynamische Temperaturmessung in der Düse der Spritzeinheit mittels Infrarot-Sensoren könnte diese Beschränkung aufheben. Durch den notwendigen Kalibrieraufwand der Sensoren und die zusätzliche Maschinenausstattung haben sich Infrarot-Messsystem zurzeit noch nicht am Markt etablieren können.

2.2.2 Dosierwegregelung

Bei der Dosierwegregelung wird versucht, bei jedem Schuss ein genau definiertes Volumen in die Kavität einzubringen, um so eine konstantes Formteilgewicht zu erreichen. Die Besonderheit bei diesem Verfahren ist, dass am Ende der Nachdruckphase die Schnecke ohne Restmassepolster am vorderen Anschlag des Zylinders steht. Der Werkzeuginnendruck ist an diesem Punkt auf den Umgebungsdruck abgefallen. Durch Versuche wird zunächst ein optimaler Prozessablauf ermittelt, der die gewünschte Qualität sicherstellt. Anschließend werden dem Werkzeuginnendruckverlauf an bestimmten Punkten entsprechende Schneckenpositionen zugeordnet. Ergibt sich durch Störungen ein anderes spezifisches Volumen der Schmelze, so erreicht die Schnecke den vorderen Endpunkt früher oder später als im optimalen Verlauf ermittelt. Durch Nachstellen des Dosierweges wird der zuvor ermittelte Zusammenhang zwischen Schneckenweg und Werkzeuginnendruckverlauf wieder hergestellt [Hu75, Uj99, Va96]. Die Dosierwegregelung ist stark von der Reproduzierbarkeit des Schließverhaltens der Rückströmsperre abhängig. Das Schließen der Rückströmsperre ist meist stochastischen Einflüssen unterworfen und verursacht so ungewollte Streuungen [KWN01]. Weiterhin ist die Rückströmsperre einem Verschleiß unterlegen, der über diese Regelung nicht kompensiert werden kann.

2.2.3 Werkzeuginnendruckregelung

Die große Zahl von Forschungsarbeiten zur Regelung des Werkzeuginnendruckes macht deutlich, wie groß der Einfluss dieser Prozessgröße auf die Bauteilqualität ist. Trotz aller Bemühungen ist es aber unter alleiniger Betrachtung des Parameters Werkzeuginnendruck nicht gelungen, materialbedingte Störeinflüsse, die sich auf die Bauteilqualität auswirken, ausreichend kompensieren zu können. Allen bisher beschriebenen Konzepten ist gemeinsam, dass sie keine eigentliche Qualitätsregelung verfolgen, sondern primär eine Prozessregelung anstreben. Unter Testbedingungen, die meist dem Optimum entsprechen, können die meisten Konzepte Wirkung zeigen. In der Realität der Spritzgießproduktion sind diese optimalen Bedingungen allerdings selten zu finden.

Der Werkzeuginnendruck hat eine hohe verfahrenstechnische Bedeutung für die Bauteilqualität. Aufgrund der starken Wechselwirkungen zwischen Werkzeuginnendruck, Einspritzparametern, Werkzeugtemperatur und Materialeigenschaften [Bi94, Wa00] ist dieser Prozessparameter in der Vergangenheit für verschiedene Regelungskonzepte herangezo-

gen worden. Die Korrelation des Werkzeuginnendruckverlaufes mit der Qualität ist ausgiebig erforscht und in der Literatur dargestellt [St73, He76, Rö79, Sa79, Bo82].

In der einfachsten Variante einer Werkzeuginnendruckregelung wird das Werkzeuginnen-druckmaximum in einer „Schuss zu Schuss“ Regelung auf einen konstanten Wert geregelt. Bei diesem Konzept wird der Umschaltdruck nachgeführt. Hiermit werden bereits gute Er-gebnisse erreicht [He77, Me77]. Störungen können hierbei immer im darauf folgenden Schuss kompensiert werden. In alternativen Konzepten zur Werkzeuginnendruckregelung ist nachfolgend über die Definition eines Prozessindex eine Regelung des Werkzeugin-nendruckmaximums auch innerhalb eines Zyklus möglich. Durch die Adaption der Modell-gleichungen für den Prozessindex wird eine Anpassung an unterschiedliche Prozesszu-stände gewährleistet [Me74]. Der Vorteil dieser Variante gegenüber anderen Konzepten liegt darin, dass der Einfluss von Störungen bereits im selben Zyklus kompensiert werden kann. In [Sm91] wird eine Regelung vorgestellt, bei der der Werkzeuginnendruck während eines Prozessabschnittes geregelt wird. Auch die Wirksamkeit dieses Konzeptes konnte in verschiedenen Tests bewiesen werden [Sm91, Uj99]. Weitere Ansätze der Werkzeugin-nendruckregelung mit Modellierung der Prozessabläufe stellten [Ri87, Wa91, Va96] vor. Ursprünglich werden hier rein statistische Modelle verwendet, welche die Nachdruckhöhe bei bestimmten Massetemperaturschwankungen anpassen. In der Weiterentwicklung die-ses Ansatzes wird auf ein physikalisches Modell zurückgegriffen, welches in der Lage ist, die Volumenschwindung zu berechnen.

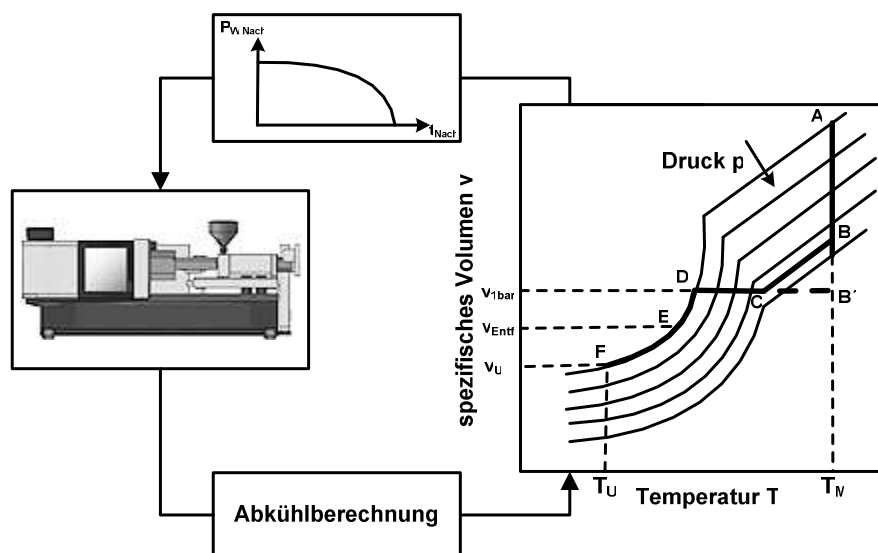


Abbildung 2-3: pvT-Optimierung nach [Va96]

Die im pvT-Diagramm durchlaufenden Prozessphasen können wie folgt gekennzeichnet werden:

- A-B: Einspritzen und Umschalten auf Nachdruck
- B-C: Nachdruck mit Massefluss
- C: Anguss eingefroren
- C-D: isochore Abkühlung
- D: Erreichen von Umgebungsdruck, Bauteilgewicht festgelegt
- D-E: Verarbeitungsschwindung
- E-F: Abkühlung auf Umgebungstemperatur

Daraus entwickelte sich ein System zur direkten Regelung des Werkzeuginnendrucks, das in [Gr05] beschrieben ist. In diesem Konzept wird ein Soll-Verlauf für den Werkzeuginnendruck vorgegeben, der über eine Anpassung der Schneckenvorlaufgeschwindigkeit eingestellt wird. Zur Regelung der Schneckengeschwindigkeit wird ein prädikativer Regler verwendet, der auf einem künstlichen neuronalen Netz basiert. [MGS06, Sc06] Dieser Ansatz wird weiter entwickelt und um eine sogenannte pvT-Optimierung erweitert, die den Werkzeuginnendruckverlauf in der Nachdruckphase auf der Basis des pvT-Verhaltens des Rohstoffes aktiv anpasst [PA90, MSL08, MS08b].

Der pvT-Regelung wird ein hohes Potenzial zur Erreichung einer konstanten Produktqualität zugesprochen. Die Idee der pvT-Optimierung beruht auf der Beschreibung des Zustandsverlaufs der Formteilbildung im Druck-, Dichte-, Temperaturkennfeld des verarbeiteten Polymers. Ziel der Regelung ist es dabei, den Umgebungsdruck (1bar-Linie) immer beim gleichen spezifischen Volumen zu erreichen [Var74, He76, He77, Ma85, PA90, Uj99, Gr05, MS08a, MS08b].

Unter Voraussetzung einer isochoren Prozessführung zwischen Zustand C und D kann das spezifische Volumen nur im Bereich zwischen Zustand A und C beeinflusst werden. Geht man davon aus, dass die Einspritzphase sehr schnell abläuft, besteht die Möglichkeit der Beeinflussung des spezifischen Bauteilvolumens ausschließlich durch eine Regelung der Nachdruckhöhe und -zeit zwischen Punkt B und C.

Der einzustellende Nachdruckverlauf bzw. die Nachdruckzeit wird aus dem pvT-Diagramm ermittelt. Das pvT-Verhalten muss vor dem Einsatz der Regelung an der Spritzgießmaschine über Labormessgeräte ermittelt werden und dem System zur Verfügung gestellt werden. In [MS08b] wird ein Ansatz vorgestellt, bei dem die notwendigen Materialkenndaten als betriebspunktabhängiges Kennfeld direkt an der Produktionsmaschine gemessen werden können. Dadurch sollen, neben der Vereinfachung des Verfahrens, systematische Fehler bei der Materialdatenermittlung, die von der verwendeten Maschine und deren Verschleißzustand abhängen, kompensiert werden.

Zur Realisierung des Regelungsansatzes muss das Werkzeug mit zusätzlicher Sensorik ausgerüstet werden. Neben dem Drucksensor ist eine Temperaturmessstelle notwendig, um den Prozessverlauf im pvT-Diagramm nachvollziehen zu können. Wird der zeitliche Temperaturverlauf in [Va96] über eine Abkühlrechnung aus der im Schneckenorraum in der Einspritzphase gemessenen Massetemperatur und der Werkzeugtemperatur errechnet, kommt im Ansatz aus [MS08b] ein Infrarot-Temperatursensor in der Kavität zum Einsatz.

In Laborversuchsreihen erreicht ein mit einer pvT-Regelung geführter Spritzgießprozess im Vergleich zu einem Standard-Spritzgießprozess, bei simulierten Prozessstörungen (Zylinder- und Werkzeugtemperaturvariation von jeweils ± 20 K), konstantere Formteilgewichte [MS08b].

Ein weiterer Vorteil entsteht durch die direkte Regelung des Druckverlaufes in der Kavität, durch die Abweichungen im Betriebsverhalten der Maschine durch den Regler korrigiert werden. Stochastische Abweichungen im Schließverhalten der Rückströmsperre könnten so z.B. durch die Regelung korrigiert werden. Inwiefern der Werkzeuginnendruckregler auch verschleißbedingte Effekte im System ausregeln kann, bleibt offen.

Ein Nachteil des pvT-Regelungskonzepts ist, dass das zum verarbeiteten Material gehörende pvT-Diagramm bekannt sein muss. Weiterhin ist nicht immer gegeben, dass das im Labor ermittelte pvT-Diagramm dem realen Verhalten bei einem bestimmten Betriebspunkt während des hochdynamisch ablaufenden Spritzgießprozesses entspricht. Der Ansatz, die Materialeigenschaften aus einem experimentell zu ermittelndes Kennfeld abzuleiten umgeht diese Einschränkung, verursacht jedoch einen nicht unerheblichen Versuchsaufwand. Weiterhin haben die bereits zu Beginn dieses Kapitels beschriebenen Eigenschaftsänderungen durch Chargen- oder Restfeuchtigkeitseffekte einen großen Einfluss auf das Verarbeitungsverhalten des Rohstoffes. Für ein konstantes Einhalten von geringen Regelabweichungen wird eine Adaption des in der Regelung hinterlegten pvT-Verhaltens an die aktuelle Rohstoffcharakteristik notwendig.

Eine Hindernis der Markteinführung stellen die zur Anwendung des Regelungsansatzes zusätzlich zu tätigen Investitionen in die erforderliche Werkzeuginnendruck- und Temperatursensorik dar.

2.2.4 Regelung des Umschaltpunktes

Neben den klassischen Umschaltverfahren wie dem weg- oder zeitabhängigen Umschalten werden in der Literatur auch neue Ansätze zum Umschalten zwischen Einspritz- und Nachdruckphase vorgestellt. Vorteil des klassischen Verfahrens einer positions- oder volumenabhängigen Umschaltung ist, dass keine zusätzliche Sensorik an der Maschine benötigt wird.

Andere Ansätze beruhen auf der werkzeuginnendruckabhängigen Umschaltung oder der Umschaltung durch optische Sensoren [Ku97]. Bei den Methoden der werkzeuginnendruckabhängigen Umschaltung wird ein Werkzeuginnendruckverlauf überwacht und das

Umschalten bei einem definierten Druckwert eingeleitet. Andere Verfahren überwachen den Druckverlauf und erkennen den Füllgrad der Kavität anhand einer Steigungsänderung in der Druckkurve. An diesem Punkt wird das Umschalten dann eingeleitet. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass kein Schwellenwert vorgegeben, sondern der Umschalt- punkt selbstständig bei volumetrischer Füllung der Kavität erkannt wird [Ku97]. Nicht bei allen Werkzeugen ist ein solcher Innendruckgradient zu verzeichnen, weshalb sich diese Variante nicht für alle Werkzeuge eignet. Bei Bauteilen mit sehr kleinen Volumina und hohen Einspritzgeschwindigkeiten sowie bei den heutzutage immer mehr an Bedeutung zunehmenden dünnwandigen Bauteilen ist dieses Verfahren beispielsweise nur schwer anwendbar [Th06].

Bei anderen Umschaltverfahren wird der Füllgrad des Werkzeugs nicht anhand der Druckkurve sondern durch in das Werkzeug integrierte optische Sensoren ermittelt. Durch Änderungen der Reflexionseigenschaften bei Vorbeifließen der Schmelze kann eine volumetrische Füllung des Werkzeugs gut erkannt werden [Ku97]. Optische Sensoren müssen jedoch in das Werkzeug eingearbeitet werden und stellen somit eine finanzielle Mehrbelastung dar, weswegen sich ihre Verwendung für diesen Zweck nicht durchgesetzt hat. In experimentellen Untersuchungen konnten beide Umschaltverfahren gute Wirkung in Bezug auf die Reproduzierbarkeit der Prozessabläufe zeigen. Weiterhin konnten mit dem optischen Verfahren Störungen kompensiert und der Umschaltvorgang unabhängig vom Material zum optimalen Zeitpunkt ausgelöst werden, wodurch durchaus Verbesserungen in Bezug auf konstante Produktqualität erreicht werden konnten [Ku97]. Es handelt sich jedoch bei diesem Ansatz nicht um eine Qualitätsregelung im eigentlichen Sinn, vielmehr werden durch neue sensorische Möglichkeiten verfügbare Informationen zur Prozesssteuerung genutzt.

2.3 Regelung von aggregierten Prozesskennzahlen

Unter Prozesskennzahlen sind Zahlenwerte zu verstehen die aus an der Spritzgießmaschine gemessenen Prozessgrößenverläufen durch eine mathematische/statistische Auswertung extrahiert werden können. Diese sollen den Prozess durch Verdichtung der enthaltenen Informationen besser charakterisieren [Mu00]. Prozesskennzahlen errechnen sich meist durch Mittelwertbildung, Maximalwerte, Summenbildung, Integrale über bestimmte Zeitabschnitte oder aber auch aus Produkten mehrerer Größen. Die Regelung von Prozesskennzahlen verfolgt dabei das Ziel, diese berechneten Kennwerte auf konstante Werte zu regeln. Die wichtigsten Regelungskonzepte von Prozesskennwerten werden nachfolgend dargestellt.

2.3.1 Integrale Temperaturerhöhung

Ausgehend von der Massetemperatur kann für die Einspritzphase ein Kennwert gebildet werden, der die Temperaturerhöhung der Polymerschmelze in der Einspritzphase aufgrund von Scherung im Strömungskanal charakterisiert. Bedingt durch Dissipationseffekte

sowie durch Kompression kommt es zu einer Erwärmung der Schmelze [Bl96, Mu00, Ta02, Ca05]. Die integrale Temperaturerhöhung ist dabei das Maß für die induzierte Temperaturerhöhung. Voraussetzung für die Bildung des Kennwertes ist eine Temperaturmessung der Masse mittels schnell reagierender IR-Temperatursensoren. Aufgrund der starken Wechselwirkungen der Massetemperatur mit anderen Einflussgrößen hat sich die Verwendung des Kennwertes in der Qualitätsüberwachung oder Regelung nicht durchsetzen können. In Einzelfällen haben sich verschiedene Einflüsse auf die Massetemperatur in ihrer Wirkung aufgehoben und die Kennwertbildung war nicht mehr möglich. In ausgiebigen Untersuchungen hat sich deshalb nur eine geringe Eignung zur Vorhersage von Prozessstörungen gezeigt [Ta02]. Weiterhin ist für den Einsatz des Verfahrens der Einsatz von zusätzlicher Messtechnik erforderlich, was die Anwendung zusätzlich einschränkt.

2.3.2 Regelung der Einspritzarbeit / Fließzahlregelung

Die Einspritzarbeit berechnet sich aus dem Integral des über die Maschinensensorik gemessenen Massedrucks über den Schneckenweg multipliziert mit der Einspritzkolbenfläche [JoMi02]. Alternativ kann die Einspritzarbeit auch als zeitliches Integral aus dem Druck im Schneckenorraum multipliziert mit der Einspritzgeschwindigkeit und der Einspritzkolbenfläche ermittelt werden.

$$W_E = A_K \int_{s_0}^{s_1} p(s) ds \quad \text{Formel 2-1}$$

$$W_E = A_K \int_{t_0}^{t_1} p(t) \cdot v(t) dt \quad \text{Formel 2-2}$$

Die Fließzahl oder der Füllindex werden ähnlich der Einspritzarbeit aus dem Integral über der Druckkurve errechnet. Im Gegensatz zur Einspritzarbeit wird jedoch das zeitliche Integral nur über einen bestimmten Zeitraum berechnet. In der Regel wird dabei aus dem Druckverlauf der Einspritzphase ein charakteristischer Bereich ausgewählt.

$$FZ = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt \quad \text{Formel 2-3}$$

Die Kennwerte Einspritzarbeit, Einspritzintegral und die Fließzahl besitzen einen ähnlichen Informationsgehalt. Die Fließzahl liefert durch die bereichsweise Berechnung in einigen Anwendungen qualitativ bessere Werte.

Alle zuvor dargestellten Parameter sind in der Lage, aussagekräftige Informationen über Rohstoffeigenschaften (Viskosität, Trocknungsgrad, Füllstoffgehalt, Recyclatanteil) zu liefern. Die nahe Korrelation zwischen Einspritzarbeit und der Verarbeitungsviskosität sowie der Bauteilmasse ist in der Vergangenheit ausgiebig erörtert worden [Mu00]. Erste Regelungskonzepte, die die Einspritzarbeit und die Fließzahl nutzen, werden in [LGP83, GL83,

PA86, JoMi02] vorgestellt. Weiterhin wurden auch adaptive Konzepte zur Fließzahlregelung entwickelt, wie sie in [St86] beschrieben werden.

2.3.3 Werkzeuginnendruckintegralregelung

Die hohe Bedeutung des Werkzeuginnendruckes für die Bauteilqualität ist in vorherigen Abschnitten bereits erläutert worden. Es ist also eine logische Schlussfolgerung, dass auch auf den Verlauf des Werkzeuginnendruckes eine spezielle Kennwertbildung angewendet wird. Ein aussagekräftiger Wert, der aus dem Werkzeuginnendruck gebildet werden kann, ist das Werkzeuginnendruckintegral. Dabei wird das gemessene Kavitätsdrucksignal über ein bestimmtes Zeitintervall integriert.

$$I^{wi} = \int_{t_1}^{t_2} p_{wi}(t) dt \quad \text{Formel 2-4}$$

Als Zeitintervalle werden dabei meist die einzelnen Prozessphasen wie Einspritz- und Nachdruckphase herangezogen. Durch die Verwendung einheitlicher Abgrenzungen werden die Kennwerte untereinander vergleichbar. Entscheidend für die Aussagekraft des Werkzeuginnendruckintegrals ist neben den Integrationsgrenzen auch die Position des Druckaufnehmers im Werkzeug. Für die frühzeitige Erkennung von Störungen ist nach [Ca05] eine angussnahe Positionierung des Drucksensors sinnvoll. Inwiefern sich Störungen von Rohstoffeigenschaften auf den Werkzeuginnendruckverlauf auswirken, sollte jedoch für jede Anwendung gesondert bewertet werden [Ca05]. Die Zielsetzung einer Werkzeuginnendruckintegralregelung ist ähnlich der Regelung des Werkzeuginnendruckverlaufes. Der Unterschied besteht darin, dass nicht der gesamte Verlauf des Werkzeuginnendruckes geregelt wird, sondern der daraus berechnete Kennwert, der im allgemeinen der durch den Druckverlauf eingeschlossenen Fläche entspricht.

Das Werkzeuginnendruckintegral zeigt ähnlich dem Werkzeuginnendruckverlauf eine sehr ausgeprägte Korrelation mit der Bauteilqualität. Besonders Formteilgewicht und Abmaße hängen nach [Gi92, Bi94, Va96] stark von dieser Prozesskennzahl ab. In [Ca05] wird ergänzend die Korrelation des Werkzeuginnendruckintegrals mit der Fließfähigkeit nachgewiesen. Ein Vorteil des Werkzeuginnendruckintegrals gegenüber anderen Prozesskennzahlen ist die Unabhängigkeit von der verwendeten Spritzgießmaschine. Nachteilig ist zur Werkzeuginnendruckintegralregelung zu erwähnen, dass das Integral erst nach der Einspritz- bzw. Nachdruckphase feststeht.

Ein Konzept, in dem das Werkzeuginnendruckintegral zur Prozessregelung herangezogen wird, ist in [Uj99] vorgestellt. Der Einfluss des Nachdruckintegrals auf die Formteilqualität wird auch hier deutlich. Aufgrund der hohen Korrelation des Werkzeuginnendruckes mit der Formteilmasse verfügt dieses Konzept über ein hohes Potenzial zur Beeinflussung der Bauteilqualität respektive der Formteilmasse. Es handelt sich im eigentlichen Ansatz jedoch um eine Prozessregelung, da konstante Prozessparameter bzw. Kennwerte angestrebt werden.

So soll unabhängig von der Rohstoffcharge ein konstantes Nachdruckintegral angestrebt werden. Kommt es bedingt durch rohstoffinduzierte Prozessstörungen zu Abweichungen in den Schmelzeviskositäten, wird sich bei einem identischen Werkzeuginnendruckintegral eine divergente Formteilqualität einstellen.

2.4 Qualitätsregelung durch eine Rückführung der Produktqualität

Unter den qualitätsabhängigen Regelungen mit Rückführung der Produktqualität werden hier Regelungsmethoden zusammengefasst, die auf der Messung von Qualitätsmerkmalen bzw. eines repräsentativen Merkmals wie dem Bauteilgewicht beruhen. Die Rückführung des Regelkreises bildet dabei eine gemessene Größe, welche mit dem Vorgabewert verglichen wird. Über ein Modell werden dann die Zusammenhänge aus gemessener Produktqualität und Maschineneinstellungen gebildet. Unabhängig davon, ob das Qualitätsmerkmal automatisch (Ausfallwaagen) oder manuell (Handwaagen) bzw. innerhalb oder außerhalb eines Werkzeuges aufgenommen wird, ist für die qualitätsabhängige Regelung entscheidend, dass ein Parameter, der die Bauteilqualität kennzeichnet, gemessen wird und nicht wie bei anderen Regelungskonzepten über ein Qualitätsmodell aus Prozessparametern oder Kennzahlen bestimmt wird. Ansätze solcher Regelungskonzepte werden in [Hü85, Le85, SSM92] vorgestellt. Hierbei wird das Gewicht bzw. ein speziell ausgewähltes Bauteilmaß durch Nachstellen der Maschineneinstellparameter auf einen vorgegebenen Wert geregelt. Schwankungen im Formteilgewicht konnten dabei nach 10-20 Zyklen ausgeregelt werden [Hü85, Le85, Uj99]. Die kontinuierliche Messung der Qualitätsparameter ist in der praktischen Anwendung nicht realisierbar.

2.5 Prognosebasierte Qualitätsregelung

Neuere Methoden, die die Messung von Qualitätseigenschaften umgehen, basieren auf einer Modellierung der Prozessabläufe über verschiedenste Modelle.

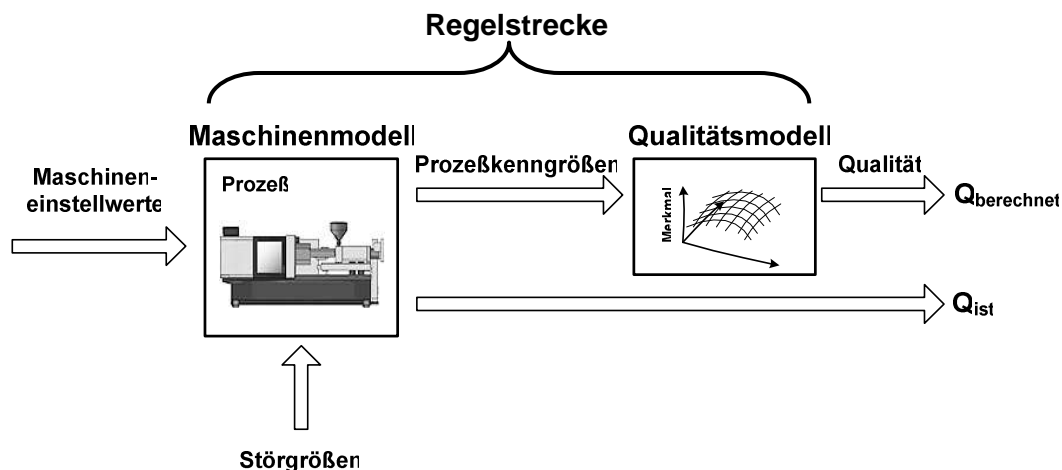


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der indirekten Qualitätsregelung nach [Va96]

Dabei sollen die Zusammenhänge zwischen Prozessbedingungen und Formteilqualität beschrieben werden. Über ein Qualitätsmodell werden aus Prozessgrößen Qualitätsmerkmale errechnet oder vorhergesagt, welche für die Rückführung im Regelkreis verwendet werden. Es findet eine Qualitätsregelung ohne Kenntnis der eigentlichen Qualität statt. Der Regler berechnet ausgehend von den vorhergesagten Qualitätsmerkmalen neue Maschineneinstellparameter. Grundsätzlich kann man zwei verschiedene Methoden der Modellbildung unterscheiden.

2.5.1 Modellierung über physikalische Modelle

Bei der physikalischen Modellbildung versucht man entweder den gesamten oder nur Teile des Prozesses anhand von physikalischen Phänomenen zu beschreiben und in Form von mathematischen Gleichungen darzustellen. Dabei sollen die Eigenschaftsänderungen vom Granulat bis zum fertigen Bauteil beschrieben werden [Ma85, Wa00]. Bis heute existieren einige Ansätze der physikalischen Beschreibung wie z.B. in [Ma85]. Aufgrund der hohen Komplexität der Prozesse ist es bisher nicht gelungen, alle notwendigen physikalischen Phänomene eines laufenden Spritzgießprozesses ausreichend genau abzubilden [P JW95, Wo97, Kr91, Wa00]. Physikalische Modelle werden deshalb zumeist für einzelne Prozessphasen eingesetzt. Die resultierenden Gleichungssysteme sind meist nicht mehr analytisch lösbar und müssen numerisch gelöst werden. Nachteile der physikalischen Beschreibung von Prozessabläufen liegen in den starken Abhängigkeiten von zu treffenden Vereinfachungen, Rand- und Anfangsbedingungen sowie der Materialeigenschaftsbeschreibung [Wa00]. Dies ist ebenfalls einer der Gründe, weshalb mittels physikalischer Modelle die Auswirkungen von rohstoffgetragenen Störungen nur schwer oder unzureichend erfasst werden können.

2.5.2 Modellierung über statistische Modelle

Nachdem man erkannt hat, dass die Prozessabläufe des Spritzgießzyklus mit den komplexen Wechselwirkungen nicht mit ausreichender Genauigkeit analytisch abzubilden sind, sucht man nach anderen Möglichkeiten den Prozess abbilden zu können. Alternativ zur physikalischen Beschreibung werden empirische Ansätze zur Charakterisierung von Prozesszusammenhängen verwendet. Diese stellen den Zusammenhang zwischen Prozess- und Qualitätsgrößen anhand von gemessenen Datensätzen des Produktionsprozesses dar. Im Gegensatz zu physikalischen Modellen werden hierbei zunächst keine Informationen über physikalische Zusammenhänge benötigt. Bei der anschließenden Modellbildung fließt der notwendige Teil an Prozesswissen in den Prozess ein.

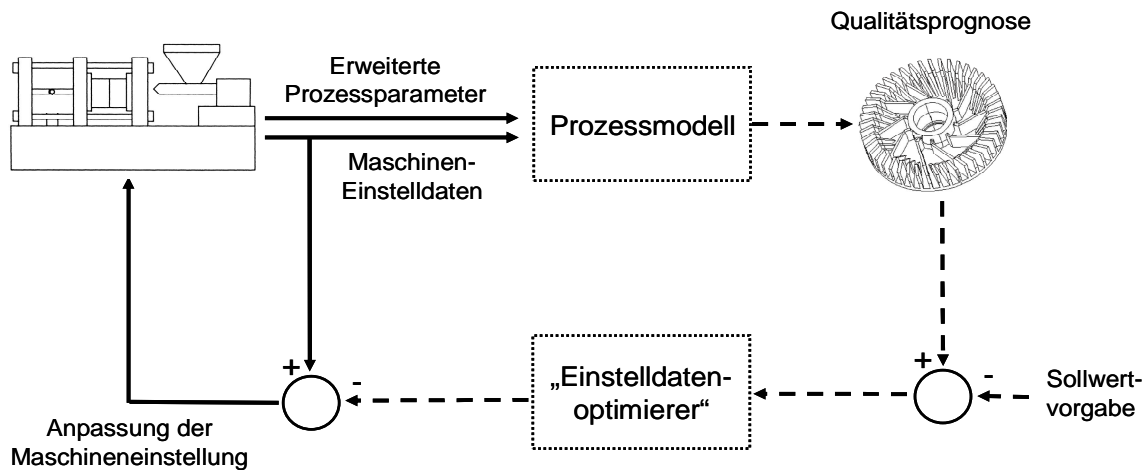


Abbildung 2-5: Qualitätsprognose über ein Prozessmodell und Rückführung der Abweichung nach [WS08, WSF08]

Nachteilig ist zu erwähnen, dass empirische Modelle physikalisch begründet sein können, jedoch nicht zwangsläufig den Prozessen in der Realität entsprechen. Gefundene Zusammenhänge können nur rein zufällig begründet sein.

Die Modellbildung bei empirischen Methoden erfolgt mittels mathematisch/statistischer Verfahren oder auch über die Methoden der „Computational Intelligence“ (CI). Zu den CI-Methoden seien hier die neuronalen Netzwerke [Hä95, Sc95, MFS96, KP98, WWM97, Wa00], Fuzzy-Logik und genetische Algorithmen erwähnt.

Insgesamt hat die Modellbildung einen sehr hohen Stellenwert in Bezug auf die Qualitätsregelung eingenommen. In vielen vorgestellten Regelungskonzepten werden Modelle in unterschiedlichsten Ausführungen eingesetzt, um die komplexen, analytisch/physikalisch nicht zu beschreibenden Zusammenhänge des Spritzgießzyklus darstellen zu können.

2.6 Zustandsregelungen

Die hohe Komplexität der Prozessabläufe hat dazu geführt, dass neben den beschriebenen Ansätzen auch immer häufiger regelungstechnische Ansätze verfolgt wurden, um die bestehenden Probleme bei der Qualitätsregelung zu lösen. Dazu wurden zunächst umfassende Zustandsraummodelle, die den Spritzgießzyklus beschreiben, in regelungstechnischer Form aufgestellt und mit entsprechenden Methoden der Regelungstechnik untersucht. Als wichtigste Methoden seien hier die stationären Endwerte, die Zustandsregelung mit Beobachter und die Zustandsregelung mit Kalman-Filter genannt [Va96]. Bei der Methode der stationären Endwerte geht man davon aus, dass nach einer genügend langen Wartezeit alle Stellgrößenänderungen voll ausgeprägt und wirksam sind. Das dynamische Verhalten wird demnach vernachlässigt, und alle Zustände werden als stationär angesehen. In praktischen Untersuchungen konnte das Verhalten des Reglers untersucht werden. Insgesamt erweist sich dieses Regelungskonzept als relativ langsam, da jeweils eine

bestimmte Verzögerungszeit abgewartet wird, bevor ein neuer Stelleingriff getätigt wird. Die Kompensation von Störungen erfolgt zuverlässig [Mu00, Va96]. Bei der Zustandsregelung mit Beobachter werden die aktuellen Zustände, die nicht messbar sind, über einen Beobachter geschätzt [Vac96]. Gemessen am Aufwand der Modellbildung zeigte das Konzept mit Beobachter die schlechtesten Ergebnisse in der praktischen Anwendung [Va96].

2.7 Prozessführung in der Einspritz- und Nachdruckphase

Aktuelle Spritzgießmaschinen verfügen über Achsantriebe, die in der Lage sind die Verfahrbewegungen der Maschinenachsen wiederholgenau zu realisieren. Insbesondere gilt dies für elektromechanische Maschinen, die im Allgemeinen auch höhere Prozessfähigkeiten erreichen [WKS03, WJK04, WS08, MM08].

Die Prozessführung, die den Bewegungsablauf der Einspritzbewegung an Spritzgießmaschinen vorgibt, basiert heute auf den Möglichkeiten elektrohydraulisch angetriebener Spritzgießmaschinen. An eine geschwindigkeitsgeregelter Einspritzphase schließt sich eine druckgeregelter Nachdruckphase an. Bei dieser Prozessführung werden die sensorischen und antriebstechnischen Möglichkeiten heutiger elektromechanisch angetriebener Einspritzachsen nicht ausgenutzt.

Im Rahmen dieser Arbeit werden alternative Wege zur Führung der Einspritzbewegung angedacht, die auf den Möglichkeiten der elektromechanischen Antriebe aufbauen. Dabei wird möglichst viel Prozesswissen aus den in der Maschine vorhandenen Informationen extrahiert und dieses zur aktiven Steigerung der Prozessrobustheit verwendet. Abweichungen in der Qualität der plastifizierten Schmelze oder im Betriebsverhalten der Rückströmsperre werden über die in der Maschine vorhandene Sensorik erkannt und der Prozess entsprechend angepasst.

Neben der Verbesserung der Prozessrobustheit gibt es noch eine weitere Motivation, den Einspritzvorgang alternativ zu führen. Beim Umschalten in die Nachdruckphase wird vielfach zum schnellen Erreichen des eingestellten Nachdruckniveaus die Schnecke zurückgezogen. Die dabei auftretenden Belastungen sind bei elektromechanischen Achsantrieben sehr viel höher als bei entsprechenden elektrohydraulischen Varianten. Insbesondere wird die Kugelumlaufspindel, die die Drehbewegung des Motors in eine translatorische Bewegung wandelt, äußerst hoch belastet. Diese Betriebsweise wirkt sich nach heutigem Stand der Technik sehr nachteilig auf die Lebensdauer der Maschinenelemente aus [Ja08].

3 Nutzung von Prozesswissen zur Steigerung der Prozessfähigkeit

Seitdem elektronische Steuerungen in Spritzgießmaschinen zur Anwendung kommen, besteht prinzipiell die Möglichkeit, Informationen über die in der Maschine laufenden Prozesse zu erhalten und zur Überwachung zu nutzen. Seit Mitte der 1980er Jahre werden Ansätze zur Überwachung und Optimierung kunststoffverarbeitender Prozesse entwickelt. Anfangs wurden dazu Prüfmethoden aus anderen Industriebereichen übernommen, später wurden die Verfahren immer mehr an die Anforderungen der Spritzgießproduktion angepasst. In [Bo94] werden z.B. Elemente der „Taguchi-Methode“ [Ta87, TC91], deren Ziel es ist Prozesse hinsichtlich ihrer Streuung zu optimieren und auf vorgegebene Sollwerte zu zentrieren, auf den Spritzgießprozess angepasst.

Die statistische Prozessüberwachung (SPC - Statistical Process Control) ist ein auf mathematisch-statistischen Grundlagen basierendes Verfahren, um einen laufenden und optimierten Produktionsprozess durch regelmäßige stichprobenartige Beobachtungen und gegebenenfalls vorgenommene Korrekturen der Prozessparameter in diesem Zustand zu halten [KB95]. Dabei unterscheidet man verschiedene Varianten, die SPC am fertigen Formteil und die SPC an Prozessparametern. Bei der Kontrolle des Endproduktes ergeben sich verschiedene prozessbedingte Nachteile, so kann auch bei einem verhältnismäßig hohen Prüfaufwand keine kontinuierliche Aussage über den Verlauf der Bauteilqualität getroffen werden.

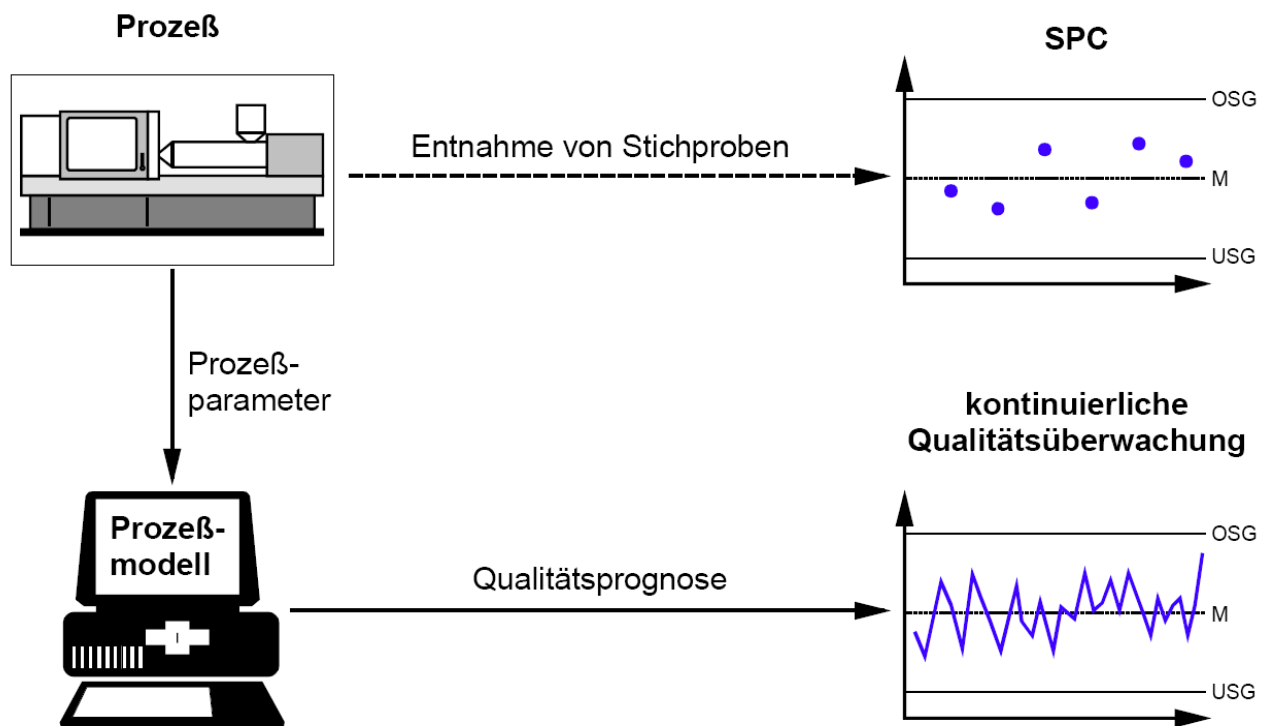


Abbildung 3-1: SPC und kontinuierliche Qualitätsüberwachung [Wa00]

Weiterhin können Abweichungen vielfach erst nach erheblicher Zeitverzögerung oder in einigen Fällen überhaupt nicht erkannt werden [Wa00]. Bei der SPC an den Prozessparametern wird durch das kontinuierliche Scannen der Prozessparameter ein Prozessabbild erstellt. Werden die so gesammelten Informationen in ein System zur kontinuierlichen Qualitätsüberwachung überführt, kann eine kontinuierliche Prozessüberwachung realisiert werden.

Die Genauigkeit der in einer Qualitätsprognose erzielten Ergebnisse hängt von der Qualität der Eingangsparameter ab. Als Hauptkriterien für die Verwendbarkeit von Prozessdaten sind zu nennen:

- Ausreichender Informationsgehalt in Bezug auf den Formteilbildungsprozess
- Ausreichender Informationsgehalt in Bezug auf die Rohstoffeigenschaften
- Konsistenz des Informationsgehaltes bei auftretenden Prozessstörungen
- Notwendigkeit der zyklussynchronen Zuordnung der Daten

Um einen ausreichenden Informationsgehalt der Daten zu erreichen, sollten die Prozessparameter nach Möglichkeit „nahe“ am Prozessablauf gemessen werden. So existieren verschiedene Ansätze, die Formteilqualität auf der Basis des Werkzeuginnendruckprofils zu überwachen oder zu regeln [NN02, Gr05]. Im Rahmen dieser Arbeit soll, neben der Beschränkung auf elektromechanische Spritzgießmaschinen, der Einsatz von zusätzlicher Sensorik ausgeschlossen werden. So soll eine einfache Übertragung in Standard-Spritzgießmaschinen ermöglicht werden.

Weiterhin ist bei der Verwendung von externer Messtechnik die Koppelung an die Maschine und den zyklischen Prozessablauf sicherzustellen. Untersuchungen an Spritzgießmaschinen mit extern angeschlossener Sensorik zeigen schnell die damit verbundenen Probleme. So muss die Datenerfassung über eine Überwachung einer Anfangsbedingung oder durch eine Schwellwertüberwachung realisiert werden. Dadurch ergeben sich schnell geringfügig verschobene Intervallgrenzen, wodurch wiederum Abweichungen in der Berechnung von Prozessparametern entstehen. Vielfach sind die Streuungen innerhalb der sekundär ermittelten Prozessparameter größer als die durch eine Störung im Prozess verursachte Änderung [Th06].

Weiterhin bieten moderne Spritzgießmaschinen eine Vielzahl an Informationen, die in den meisten Fällen heute noch nicht für die Prozessüberwachung genutzt werden [WS07, WSF08]. Im nachfolgenden Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Prozessparameter vorgestellt und auf ihre Verwertbarkeit zur Identifikation von rohstoffinduzierten Störungen hin bewertet.

3.1 Versuchsbedingungen und Versuchsablauf

Für die Durchführung von Versuchsreihen wurde eine elektromechanische Spritzgießmaschine im Technikum des *IPE* genutzt. Der dabei verwendete Versuchsaufbau wird nachfolgend beschrieben.

3.1.1 Spritzgießmaschine

Bei der zur Durchführung der Versuchsreihen verwendeten Spritzgießmaschine handelt es sich um eine am Markt erhältliche Ausführung mit einer holmlosen Schließeinheit mit 550 kN Schließkraft und einer 30 mm Standard-Einspritzeinheit. Die Einspritzeinheit erreicht bei einem spezifischen Spritzdruck von 2000 bar einen Einspritzvolumenstrom von 155 ccm/s. Die Zylinderheizzonen haben in Summe eine Heizleistung von 6,5 kW. Der Einzugsbereich des Zylinders ist mit einer Wasserkühlung ausgerüstet, die Regelung der Einzugszonentemperatur erfolgt über ein diskret schaltendes Ventil. Die Einspritzeinheit ist mit einer Standard-Dreizonen-Schnecke mit Ringrückströmsperre ausgestattet.

Der rotatorische Schneckenantrieb erfolgt über einen Servomotor, der die Schnecke über einen Zahnriemen antreibt. Für die lineare Schneckenbewegung treibt ein zweiter Servomotor ebenfalls über einen Zahnriemen gekoppelt eine Kugelumlaufspindel an, die axial hinter der Schnecke angeordnet ist. Die Servomotoren werden jeweils über separate Frequenzumrichter mit Energie versorgt. Die Positionsmessung der Einspritzachse erfolgt über einen Drehwinkelsensor am Einspritzelektromotor. Die erreichbare Genauigkeit der Messung hängt zu großen Teilen von der Qualität der Kugelumlaufspindel sowie von deren Temperatur ab. Erwärmt sich eine Spindel im Betrieb um z.B. 10 K dehnt sie sich bei einer Gesamtlänge von 500 mm um ca. 50 µm aus. Das System aus Motor, Zahnriemen und Kugelumlaufspindel erreicht jedoch schnell einen konstanten Betriebspunkt, weshalb diese Störgröße nicht mit in die Versuchsplanung einbezogen wird.

3.1.2 Versuchswerkzeuge

Für die Durchführung der Versuchsreihen wurde ein Probekörperwerkzeug verwendet. Durch den modularen Aufbau des Werkzeuges ist ein schneller Wechsel der Kavität durch ein einfaches Tauschen des Formeinsatzes möglich. Grundlage des Werkzeugkonzepts ist eine ebene Spiegelplatte auf der spritzseitigen Werkzeugaufspannplatte, in die ein angussnaher Druckaufnehmer (Typ Kistler 6152A) integriert ist. Abbildung 3-2 zeigt die in den Versuchen eingesetzten Kavitäten, eine exakte Zeichnung mit den Abmaßen der Formteile findet sich im Anhang unter 9.6. Bis auf einen Versuch zur Bewertung der Prozessparameter in Kapitel 3.2 wurden sämtliche Versuchsreihen mit dem Formteil „Farbmusterplatte“ in den Abmaßen 60x60x2 mm durchgeführt. Als repräsentativer Qualitätsparameter für die Formteilqualität wird in den Versuchsreihen das Bauteilgewicht verwendet.

Das Bauteilgewicht erreicht hohe Korrelationen mit den Bauteilabmaßen und ist auf verhältnismäßig einfache Weise in hoher Genauigkeit zu bestimmen.

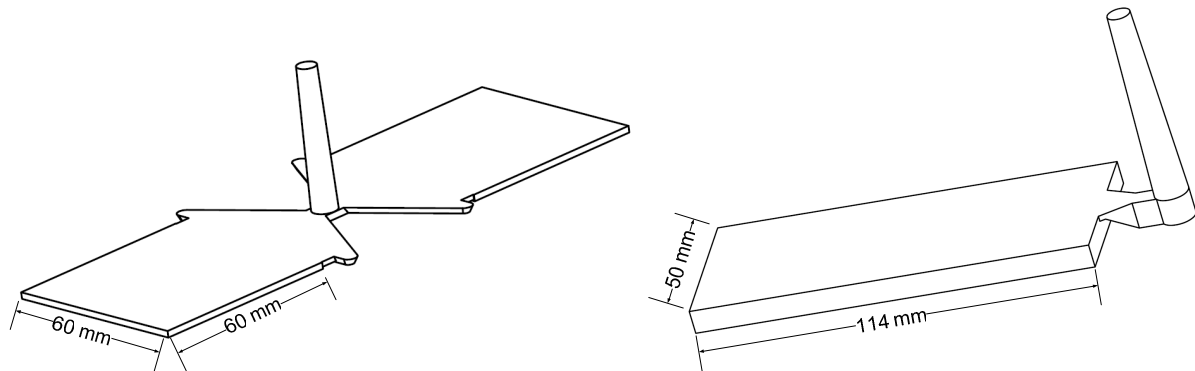


Abbildung 3-2: Zur Durchführung der Versuchsreihen verwendete Spritzgießwerkzeuge

Bei den Betrachtungen ist dabei die Tatsache zu berücksichtigen, dass z.B. Schwindungseffekte, wie sie durch abweichende Abkühlbedingungen im Werkzeug verursacht werden, oder die vollständige Ausformung von feinen Strukturen am Fließwegende, nicht erfasst werden können. Derartige Effekte auf die Formteilqualität können erst dann detektiert werden, wenn diese zu Abweichungen im Formfüllprozess führen.

3.1.3 Messtechnischer Aufbau

Zur Berechnung und Bewertung der Prozessparameter wird ein Versuchsaufbau wie in Abbildung 3-3 dargestellt, verwendet.

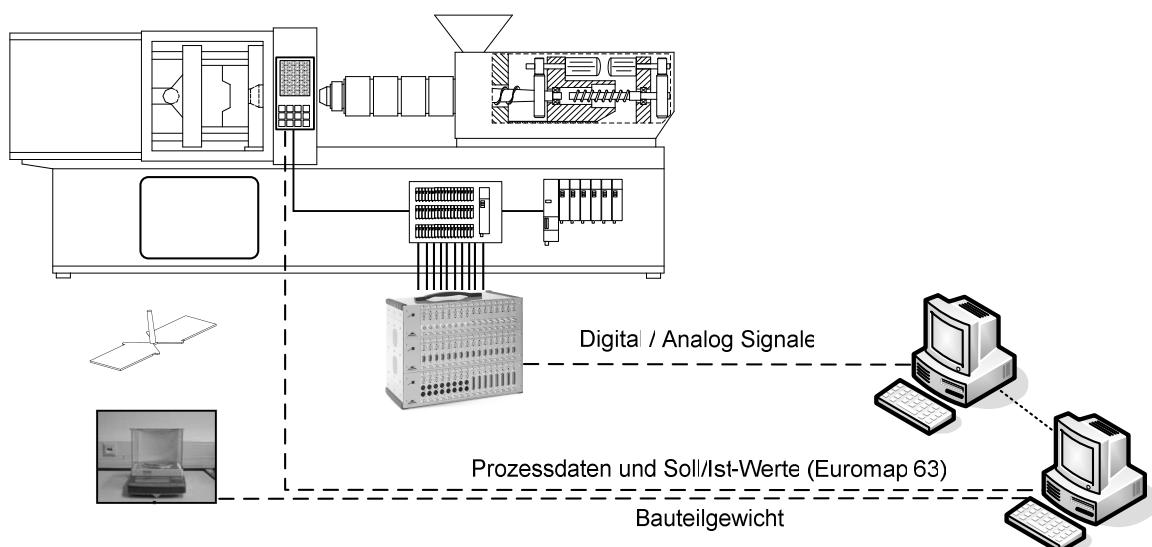


Abbildung 3-3: Schematischer Versuchsaufbau

Die Signale werden durch eine Analog/Digitalwandlung mit 12 Bit und 1000 Hz für die Berechnung von Kennzahlen bereitgestellt. Die Berechnung der Prozessparameter erfolgt mit-

tels eines PCs und der Datenverarbeitungs-Software Dasylab. Für jedes produzierte Formteil werden 64 Einzelkennzahlen berechnet und in einer Datenbank abgelegt. Darüber hinaus werden für jeden Zyklus die zeitlichen Verläufe von 14 Prozessparametern (100 Hz) zur Dokumentation des Versuches ebenfalls in der Datenbank abgelegt. Eine Auflistung aller aufgezeichneten Maschinensignale sowie der daraus berechneten Kennzahlen findet sich im Anhang 9.5.

Ein zweiter PC im Versuchsaufbau ist über ein TCP/IP-Netzwerk mit der Spritzgießmaschine verbunden. Über eine Schnittstelle nach Euromap 63 werden die maschinenintern berechneten Prozessdaten sowie die aktuellen Soll- und Istwerte der Maschine in die bereits genannte Datenbank übertragen. Das als Qualitätsparameter verwendete Bauteilgewicht wird ebenfalls in eine Schnittstelle zur Waage übertragen und gespeichert. Auf diesem PC läuft während einer Versuchsreihe die Software WinQS (Beschreibung siehe Kapitel 3.1.3.2), die zur Qualitätsprognose eingesetzt wird.

Neben den Prozessparametern, die für die Berechnung der Kennzahlen benötigt werden, werden bei den Versuchsreihen noch verschiedene zusätzliche Parameter gemessen. Diese Parameter dienen hauptsächlich der Überwachung der Spritzgießmaschine sowie des Werkzeuges. So werden z.B. mehrere Temperaturen an der Maschine (Zylinderheizzone, Zylindereinzugszone, Rohmaterial und Werkzeug) zur Überwachung der Prozesskonstanz als Mittelwert über einen Zyklus gemessen und ebenfalls zur Versuchsdokumentation gespeichert.

3.1.3.1 Datenerfassungs- und Verarbeitungssoftware

Die an der Maschine als Analog- und Digitalsignale gemessenen Signale der Prozess- und Überwachungsparameter werden mit der kommerziell verfügbaren Datenerfassungssoftware Dasylab (Data Acquisition Laboratory, Version 9.0) weiter bearbeitet. Über eine frei zusammenstellbare Oberfläche mit Funktionsblöcken (Module), die entsprechend der Aufgabe parametrisiert und zu Schaltbildern verbunden werden, werden die Eingangsdaten verarbeitet und die Kennzahlen für jeden Zyklus berechnet. Weiterhin liegen sämtliche Kennzahlen nach jedem Zyklus graphisch aufbereitet vor, um Änderungen im Prozess direkt erkennen zu können. Alle Kennzahlen werden zyklusbezogen in eine zentrale Datenbank gespeichert.

3.1.3.2 Software WinQS

Die Berechnung der Formteilqualitätsprognose, auf deren Basis eine Anpassung der Maschineneinstellung vorgenommen wird, erfolgt durch die kommerziell verfügbare Software WinQS. Eine Online-Qualitätsprognose auf der Basis des aktuellen Prozesszustandes kann über ein statistisches Prozessmodell, welches den Zusammenhang zwischen den Einflussgrößen und den Produkteigenschaften beschreibt, ermittelt werden. Es muss ermittelt werden welche Maschineneinstell- bzw. Prozessfolgegrößen für die Produktqualität des gerade produzierten Formteils signifikant sind (Abbildung 3-4).

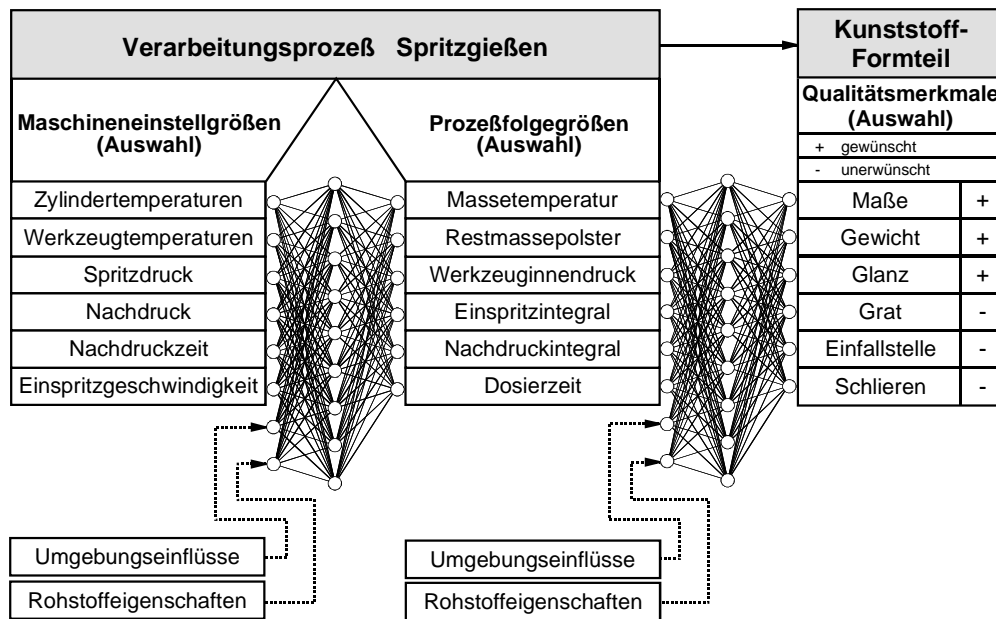


Abbildung 3-4: Darstellung der Abhängigkeiten innerhalb des Spritzgießprozesses [Wa00]

Die Aufnahme sämtlicher berechneter Prozesskennzahlen erfolgt über einen direkten Schnittstellentransfer aus der zentralen Versuchsdatenbank, in die die extern berechneten und maschineninternen Parameter gespeichert werden. So stehen für die Modellbildung sämtliche Prozessparameter zur Verfügung. Das Prognosemodell für das Formteilgewicht wird mittels einer multiplen Regressionsrechnung gebildet. Hierbei werden die Prozessdaten des laufenden Produktionsprozesses erfasst und ein Zusammenhang zwischen der Formteilqualität des Produkts und den beeinflussenden Prozessgrößen ermittelt. Dazu werden die signifikanten Prozessparameter automatisch erkannt und zur Prognosemodellbildung herangezogen. Zur Überprüfung, ob das errechnete Prozessmodell von ausreichender Genauigkeit ist, werden folgende Werte berechnet:

- Das Bestimmtheitsmaß B gibt an wie viel Prozent der Streuung der Teilemerkmale um den Betriebspunkt durch das Modell erklärt werden können.
- Das Prognoseintervall gibt den Bereich an, in dem das über das Modell ermittelte Teilemerkmal mit einer bestimmten Vertrauenswahrscheinlichkeit zu finden ist.
- Die Prognosegüte C_q beschreibt das Verhältnis zwischen den vorgegebenen Spezifikationsgrenzen des entsprechenden Teilemerkmals und den errechneten Prognoseintervallgrenzen.
- Die kritische Prognosegüte C_{qk} beschreibt den minimalen Abstand zwischen Prognoseintervall und Spezifikationsgrenzen. Je größer die Prognosegüte C_{qk} , umso besser ist die Mittellage der Prognosewerte innerhalb der Spezifikationsgrenzen. Hier sollte ein Minimalwert von $C_q \geq 2$ erreicht werden.

Für jedes Formteil kann eine Prognose über die zu erwartende Formteilqualität ausgegeben werden. Abbildung 3-5 zeigt die graphische Darstellung der über das Prozessmodell berechneten Ausprägungen des Formteilmgewichtes. Das Prognoseintervall wird dabei als grau unterlegter Bereich dargestellt.

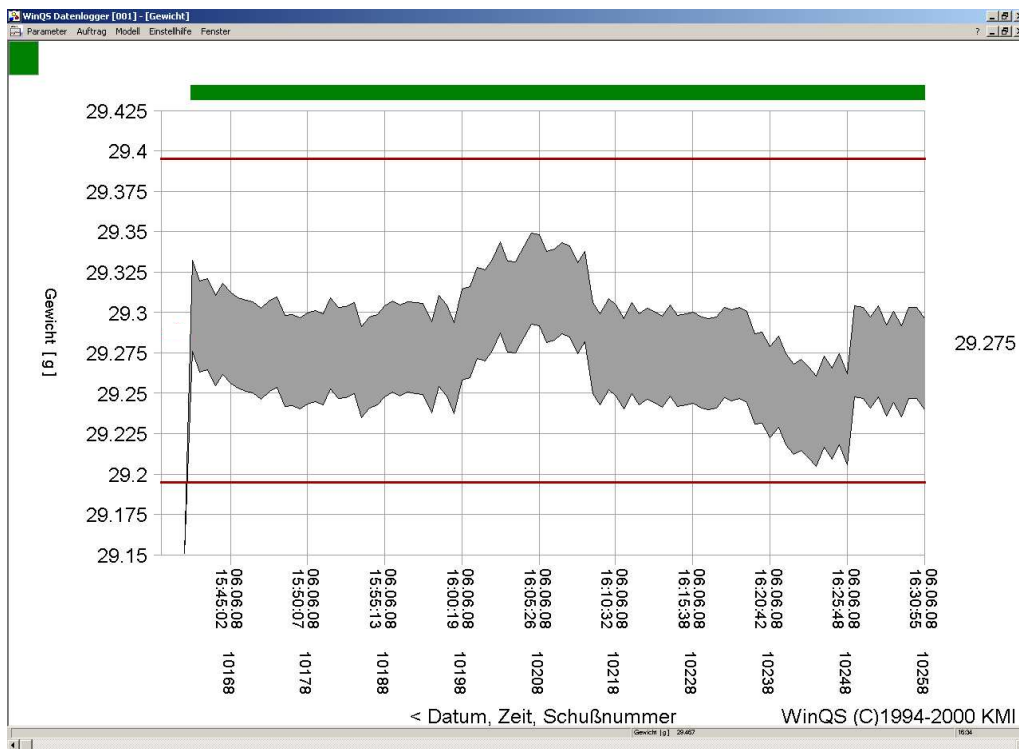


Abbildung 3-5: Prognoseband Darstellung in WinQS

Bei der statistischen Auswertung von Prozessdaten ist darauf zu achten, dass die Datenbasis von ausreichender Qualität ist. So sollten alle systematischen Fehlerquellen, wie sie z.B. durch nicht geeignete Sensoren verursacht werden, ausgeschlossen werden. Systematische Fehler äußern sich oft in proportionalen Messabweichungen.

Der Informationsgehalt der verschiedenen berechneten Prozessparameter, die für eine Modellbildung zur Verfügung stehen, wird im Rahmen dieser Arbeit untersucht. Dabei werden jedoch nicht alle Prozessparameter für die Modellbildung zugelassen. Mit Blick auf die praktische Anwendung werden nur Parameter zugelassen, die an einer elektromechanischen Standard-Spritzgießmaschine zu ermitteln sind. Zusätzliche Informationen aus zusätzlicher Sensorik, wie von einem Drucksensor im Werkzeug oder im Schneckenraum, werden bei der Modellbildung ausgeschlossen.

3.1.4 Versuchsdurchführung

Zur Bewertung der verschiedenen Prozessparameter in Bezug auf ihre Eignung zur Beschreibung des Prozesszustandes werden verschiedene Versuchsreihen durchgeführt. Als Störgröße werden gezielt Schwankungen in den Restfeuchtegehalten des verarbeiteten

Rohstoffes erzeugt. In den Versuchsreihen werden zwei verschiedene Materialtypen aus dem Bereich der technischen Thermoplaste verarbeitet.

Ein Polybuthylenterephthalat (PBT), das neben einer hohen Steifigkeit und Härte über eine gute Warmformbeständigkeit verfügt, wird deshalb häufig für technische Formteile verwendet. Beispiele für Produktgruppen sind die Elektronikindustrie oder auch der Automobilbereich. Weiterhin werden verschiedene Polyamide (PA) verarbeitet. Polyamide werden in breiten Bereichen der technischen Formteile eingesetzt und zeichnen sich durch hohe Schlagzähigkeit, gute Warmformbeständigkeit und günstige Fließeigenschaften aus. Die Materialdaten der verwendeten Rohstoffe finden sich im Anhang 9.1.

Die Versuchsreihen werden grundsätzlich wie in Abbildung 3-6 dargestellt durchgeführt. Zu Beginn wird für die jeweilige Kombination aus Spritzgießmaschine, Werkzeug und Rohstoff ein „robuster Betriebspunkt“ nach [Bo94] ermittelt. Ziel der Optimierung ist es, einen Betriebspunkt zu finden, an dem Schwankungen der Prozess-, Material- und Umgebungsbedingungen einen möglichst geringen Einfluss auf die Produktqualität besitzen. In diesem ersten Versuchsteil wird noch keine Störung auf den Prozess simuliert.

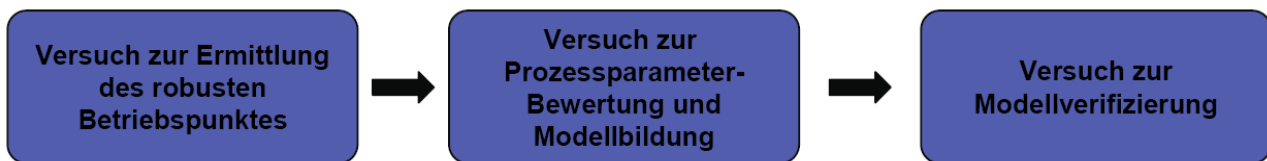


Abbildung 3-6: Schematischer Ablauf der Versuchsreihen

Daran schließt sich ein zweiter Versuchsteil an, in dem die für die Modellbildung notwendige Datenbasis erzeugt wird. Damit ein statistisch basiertes Prozessmodell anhand der Prozessparameter eine wirkende Störung erkennen kann, muss der Effekt in der Datenbasis vorhanden sein. Aus diesem Grund wird bei konstant laufendem Prozess ein Granulat abweichender Restfeuchtigkeit (als simulierte Störgröße) in den Trichter der Maschine eingefüllt. Die Maschineneinstellung wird in dieser ersten Versuchsreihe nicht angepasst.

Um im Prozessmodell die Wirkweise einer Stellgröße zur Korrektur der Störung abzubilden, muss die gewählte Stellgröße ebenfalls variiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Nachdruckhöhe aufgrund ihrer direkten Wirkung auf die Formteilqualität als Stellgröße verwendet. Weiterhin wird mit den Daten aus diesem Versuchsteil die Bewertung der Prozessparameter vorgenommen.

In einem dritten Versuchsteil wird das im vorausgegangenen Versuch gebildete Prozessmodell überprüft. Dazu wird wiederum bei konstantem Betrieb der Maschine gezielt eine Restfeuchtigkeitsstörung eingebracht. Das Prozessmodell soll dann die spezifischen Auswirkungen der Feuchtigkeitsänderung auf die Bauteilqualität prognostizieren. Auf dem Prognosewert basierend wird eine Korrektur der Maschineneinstellung vorgenommen. Dabei werden verschiedene Eingriffsgrenzen definiert, die zu einem Eingriff in die Maschineneinstellung führen.

Der zweite Versuchsteil zur Generierung der notwendigen Datenbasis verursacht in der praktischen Anwendung einen hohen Zeit- und Planungsaufwand. Speziell das gezielte Vorkonditionieren des Rohstoffes mit verschiedenen Restfeuchtigkeitsgehalten ist zeitintensiv. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit eine zusätzliche Versuchsreihe durchgeführt, in der im Modellbildungsversuch die Prozessstörung durch eine Variation der Zylindertemperatur simuliert wird. Die abweichenden Soll- und Istwerte der Zylinder-temperierung werden in diesem Fall von der Modellbildung ausgeschlossen. Im anschließenden Versuch zur Modellverifizierung wird als Störung dann wiederum, wie es in der Praxis vorkommt, die Restfeuchtigkeit des Rohmaterials variiert. Auf diese Weise wird es möglich, den Aufwand zur Modellerstellung gering zu halten.

3.2 Energie- und Arbeitsparameter an elektromechanischen Spritzgießmaschinen

Die im Rahmen dieser Arbeit an der Versuchsmaschine gemessenen Ist-Werte und die daraus abgeleiteten Prozessdaten können anhand ihrer Messstellen unterteilt werden:

- Prozessdaten der Zylindertemperierung
- Prozessdaten der Achsantriebe
- Prozessdaten der Standard- und Zusatzsensorik
- Überwachungsparameter (zur Versuchsabsicherung, -dokumentation)

Dabei werden im Rahmen dieser Arbeit aus bereits genannten Gründen ausschließlich die Gegebenheiten an elektromechanischen Spritzgießmaschinen berücksichtigt.

3.2.1 Energie/Arbeitsparameter der Zylindertemperierung

Die Temperierung des Einspritzzylinders einer Spritzgießmaschine erfolgt in der Regel über elektrische Widerstandsheizungen am Zylinder sowie über eine in den Einzugsbereich integrierte Wasserkühlung. Betrachtet man diese Elemente vor dem Hintergrund einer Energiebilanzierung, so fügen sie Energie in Form von Wärme zu oder ab. Kommt es zu Änderungen im verarbeiteten Rohmaterial, kann dies Auswirkungen auf die Energiebilanz des Systems haben.

Die Temperaturregelung erfasst die Ist-Temperaturen der verschiedenen Heizzonen entlang des Zylinders und gibt entsprechend der Regelcharakteristik die Signale an die Stellglieder weiter. Die elektrischen Widerstandsheizungen werden über Halbleiterrelais entsprechend der benötigten Heizleistung mehr oder weniger lange Zeit eingeschaltet. Vielfach wird die aktuelle Heizleistung der Heizzone als prozentualer Wert an der Benutzerschnittstelle der Spritzgießmaschine angezeigt. Bei einer Heizleistung von 50 % ist die Stromzufuhr zum Heizelement folglich die Hälfte der Zeit gegeben. Bedingt durch schwankende Versorgungsspannungen kann bei dieser Methode ein identischer Prozentwert unterschiedlichen realen Energieeinträgen entsprechen. So hat ein elektrisches Heizband mit einem Widerstand von $15,11 \Omega$ bei der Nennspannung von 230 V eine Leistung von

3500 W. Steigt die Versorgungsspannung nur um 10 V, so steigt die Leistung um 312 W auf 3812 W, was einem prozentualen Anstieg von 8,9 % entspricht. Dass Spannungsschwankungen durchaus in diesen Größenordnungen vorliegen können, zeigt eine Versuchsreihe in Technikum des Lehrstuhls. Bei dem in Abbildung 3-7 dargestellten Versuch wurde eine Spritzgießmaschine mit konstanter Maschineneinstellung betrieben und für jeden Zyklus (Zykluszeit 31,2 s) der Mittelwert der Versorgungsspannung der Zylinderheizung gebildet.

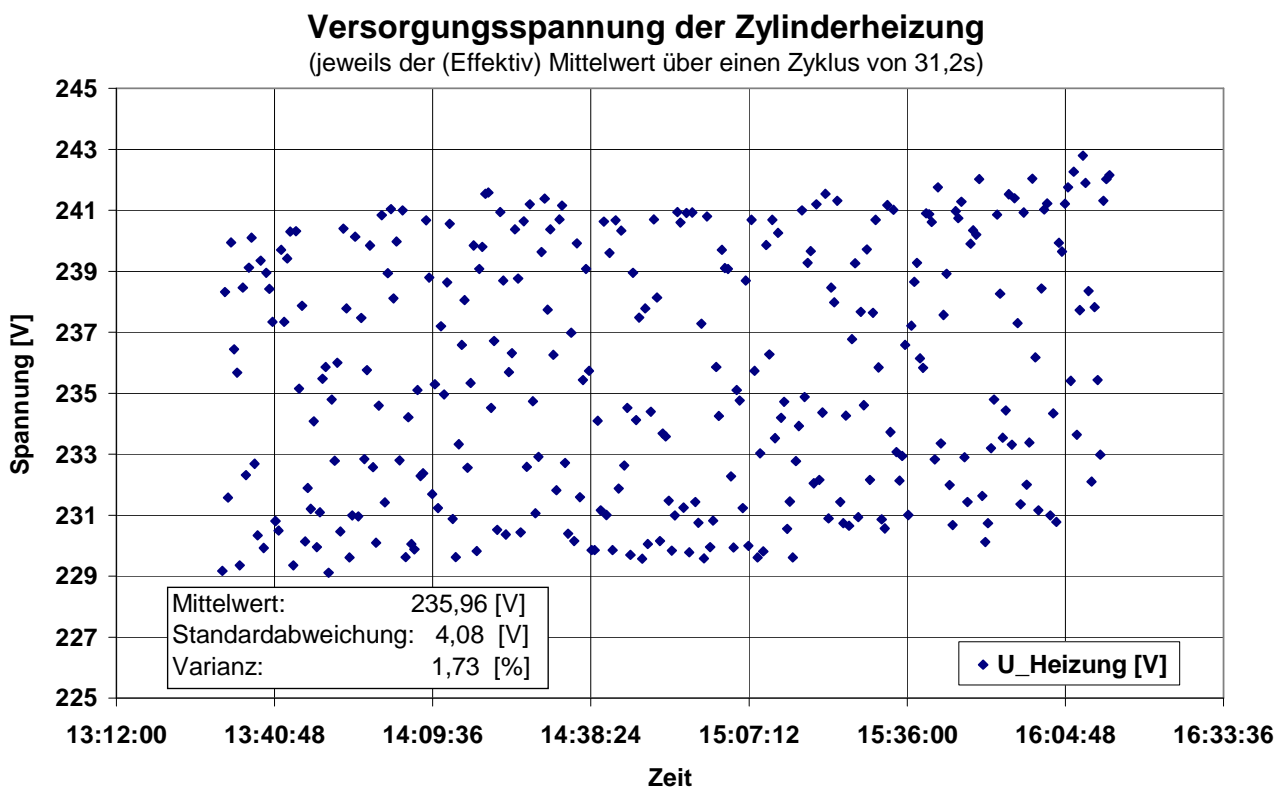


Abbildung 3-7: Versorgungsspannung der Zylinderheizung einer SGM im Technikum des Lehrstuhls

Die ermittelten Werte schwanken um einen Mittelwert von 235,96 V, eine Spannungsänderung im Bereich der Standardabweichung von 4,08 V entspricht einer Leistungsänderung von 3,5 %. Wie dieses Beispiel zeigt, ist dieser Effekt bei einer hohen Anforderung an die Messauflösung nicht außer Acht zu lassen. Im Gegensatz dazu kann die Temperaturabhängigkeit des Widerstandswertes der Heizelemente vernachlässigt werden.

$$W_{Zi} = P_{Zi} \cdot t_{Zi} = U_V \cdot I_{Zi} \cdot t_{Zi} = \frac{U_V^2}{R_{Zi}} \cdot t_{Zi} \quad \text{Formel 3-1}$$

Zum einen liegen die im kontinuierlichen Betrieb am Einspritzzylinder auftretenden Temperaturschwankungen im Bereich von wenigen Kelvin, im Normalfall sollten die Abweichungen unter 0,5 K liegen. Zum anderen hat nach Formel 3-1 eine Änderung des Widerstan-

des einen geringeren Einfluss auf das Ergebnis als eine betragsgleiche Spannungsänderung, die quadratisch in das Ergebnis eingeht.

Ist der Widerstand eines Heizelementes bekannt, kann nach Formel 3-1 der Energieeintrag für die jeweilige Einschaltdauer des Zyklus berechnet werden. Für die Versorgungsspannung U_V , wird dabei jeweils über den betreffenden Produktionszyklus der Mittelwert des effektiven Spannungswertes gebildet. Auf diese Weise kann für alle Heizelemente der Einspritzeinheit der spezifische Energieeintrag pro Zyklus ermittelt werden. In Abbildung 3-8 ist der Energieeintrag je Produktionszyklus für die verschiedenen Heizzonen entlang des Einspritzzylinders der Versuchsmaschine dargestellt. Den größten Energieeintrag leistet mit einem Mittelwert von 25,9 kW/Zyklus die hintere Heizzone, die direkt neben der Zylinderaufnahme in der Traverse lokalisiert ist. Es ist anzunehmen, dass ein größerer Teil dieser Energie über die Traverse an das Maschinengestell abgeleitet wird. Zudem ist die Einzugszone der Maschine mit einer Wasserkühlung ausgerüstet.

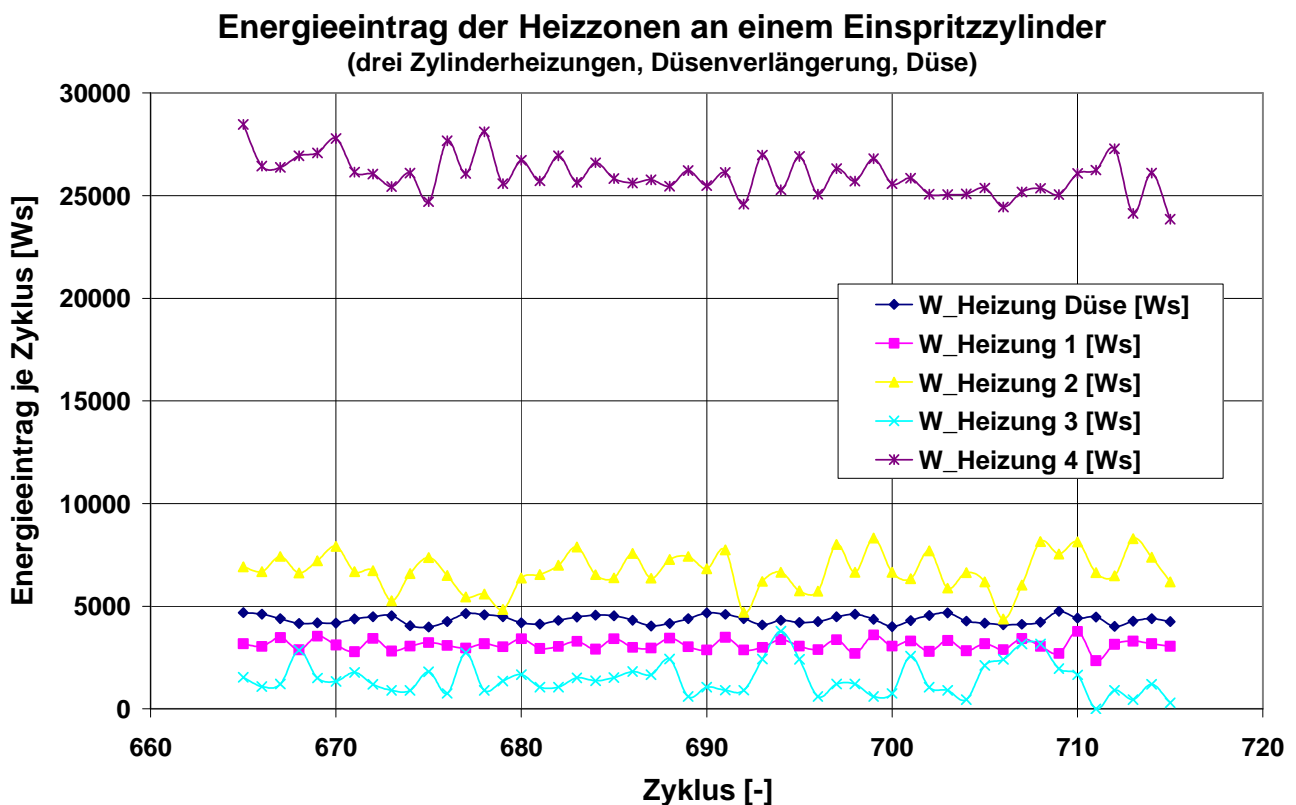


Abbildung 3-8: Energieeintrag der verschiedenen Heizzonen an einem Einspritzzylinder (Schnecken-durchmesser 30mm, Material PBT)

Die nachfolgenden Heizzonen setzen wesentlich geringere Energieanteile je Produktionszyklus um. Die Mittelwerte liegen von Zone 3 und weiter bei 1,4 kW, 6,7 kW, 3,1 kW und 4,3 kW in der Düse. Der vergleichsweise hohe Energieeintrag an der Düse ist auf die über den gesamten Zyklus am Werkzeug anliegende Düse zurückzuführen.

3.2.2 Arbeitsparameter des Einspritzantriebsstrangs

Bei der Einspritzachse einer Spritzgießmaschine handelt es sich um eine reine Vorschubachse, wie sie auch an verschiedenen Werkzeugmaschinen zu finden ist. Im Unterschied zu vielen anderen Anwendungen von elektromechanischen Linearachsen müssen an der Einspritzachse einer Spritzgießmaschine neben hohen Positioniergenauigkeiten auch hohe Kräfte realisiert werden. So muss zum Beispiel die Antriebsachse einer Spritzgießmaschine mit einem Schneckendurchmesser von 40 mm Einspritzdrücke von 2000 bar erreichen, was einer Kraft von 251 kN am Schneckenschaft entspricht. Gleichzeitig muss der Antrieb in der Plastifizierphase wesentlich geringere Kräfte reproduzierbar bereitstellen können. So entspricht ein Staudruck von 100 bar einer aufzubringenden Axialkraft von 12,5 kN.

Um diese hohen Anforderungen an die Einspritzachse erfüllen zu können, werden Servomotorantriebe eingesetzt, die über komplexe Reglerstrukturen angesteuert werden. Abbildung 3-9 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Einspritzachse mit den Hauptkomponenten.

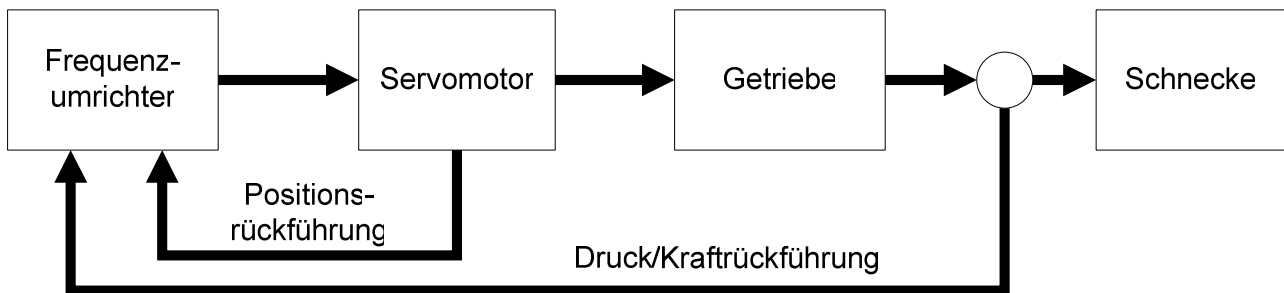


Abbildung 3-9: Komponenten und Messwertrückführung einer elektromechanischen Einspritzachse

Soll ein Einspritzvorgang erfolgen, übergibt die Ablaufsteuerung der Spritzgießmaschine Sollwerte an den Frequenzumrichter, der wiederum den Servomotor ansteuert. Entsprechend der geforderten Geschwindigkeit der Achse steuert der Frequenzumrichter den Servomotor an. Da die Einspritzphase rein geschwindigkeitsgeregelt abläuft, hat die Kraftmessstelle hinter der Schubschnecke hier nur eine Überwachungsfunktion.

Ein wichtiger Parameter in Bezug auf eine Prozessüberwachung ist das Antriebsmoment der Servomotoren, welche die Einspritz- und Plastifizierachse antreiben. Viskositätsschwankungen des verarbeiteten Polymers haben eine direkte Auswirkung auf das Drehmoment der Achsantriebe. Beschränkt man sich bei der Betrachtung auf die geschwindigkeitsgeregelte Einspritzphase, so kann man bei konstanten Maschineneinstellungen aussagekräftige Informationen aus den Drehmomenten erzielen.

In Abbildung 3-10 ist der Prozessparameter „Einspritzarbeit“ (Berechnung siehe Formel 3-4) für wechselnde Restfeuchtigkeitsgehalte des verarbeitenden Thermoplasts dargestellt.

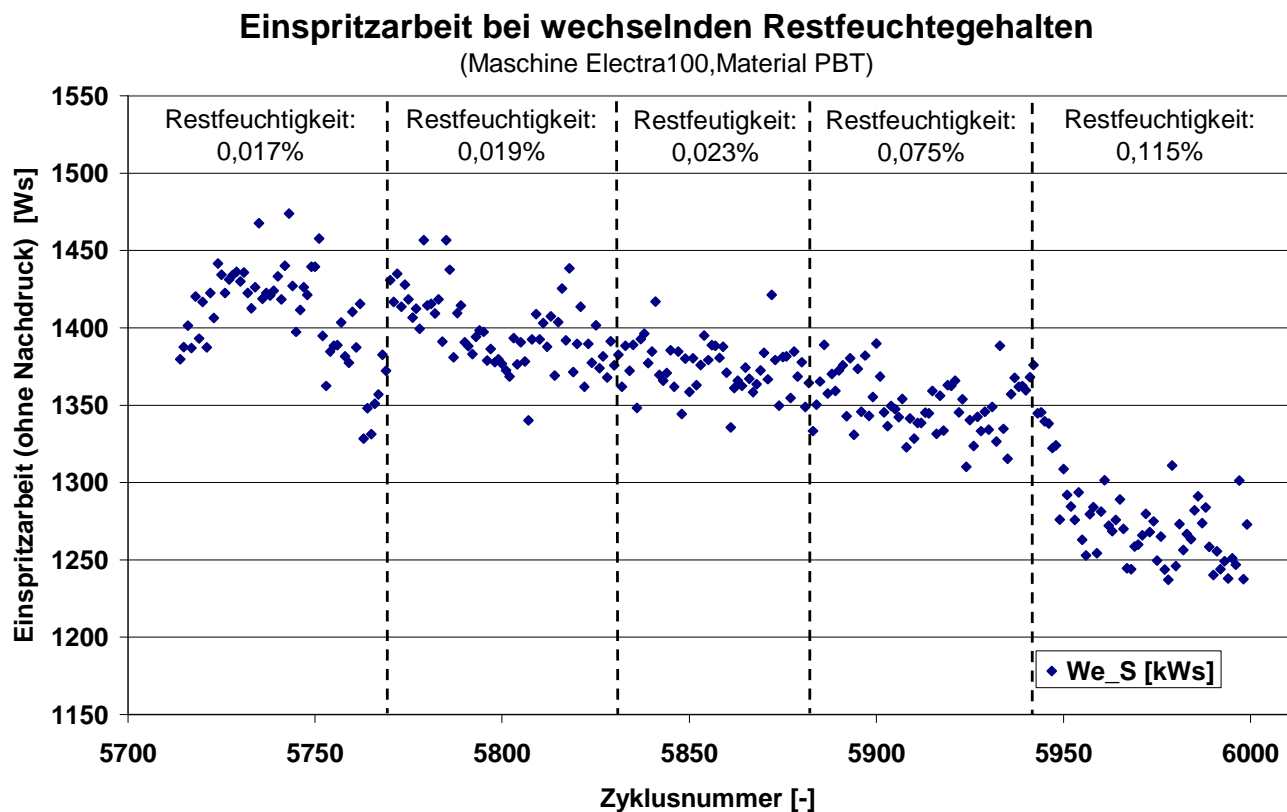


Abbildung 3-10: Einspritzarbeit bei wechselnden Restfeuchtegehalten (Elektra100, Material PBT)

Die Einspritzarbeit reagiert sensibel auf Änderungen in der Viskosität des verarbeiteten Polymers. Der Einfluss des wechselnden Restfeuchtegehaltes ist deutlich zu erkennen. Die gemessenen Werte liegen zwischen 1425 Ws und 1275 Ws, was einer Änderung von 11,7 % entspricht. Selbst im Bereich geringer Schwankungen der Restfeuchtigkeit von 0,017 % bis 0,075 % liegen die Änderungen der Einspritzarbeit bei 5,5 %.

Abbildung 3-11 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Restfeuchtegehalt im Granulat und der der Einspritzarbeit. Der ermittelte Zusammenhang ist im betrachteten Bereich annähernd linear, dabei erreicht R^2 einen Wert von 0,91.

Eine Spritzgießmaschine wird üblicherweise mit konstanter Maschineneinstellung betrieben, so dass man nach einer kurzen Einfahrphase von gleichbleibenden Prozessbedingungen ausgehen kann. Weiterhin werden von der Einspritzachse im zyklischen Betrieb immer wieder die gleichen Bewegungs- und Kraftprofile absolviert, wobei mit entsprechend gewählten Berechnungsgrenzen der Prozessparameter kein störender Einfluss bei der Bewertung von Prozessstreuungen zu erwarten ist.

Aus dem Motordrehmoment lassen sich verschiedene Prozessparameter ableiten. Zu unterscheiden sind dabei die Berechnungsweise und der jeweilige Berechnungszeitraum. In Abbildung 3-12 ist der zeitliche Verlauf der Schneckenposition und das Drehmoment des Einspritzmotors abgebildet. Es sind weiterhin die Zeitpunkte Start-Einspritzen (t_0), Umschalten auf Nachdruck (t_1) und Ende der Nachdruckphase (t_2), die für die Berechnung der Prozesskennzahlen verwendet werden, markiert.

Regressionsrechnung mit Restfeuchtigkeitsgehalt und Einspritzarbeit (Maschine Electra100, Material PBT)

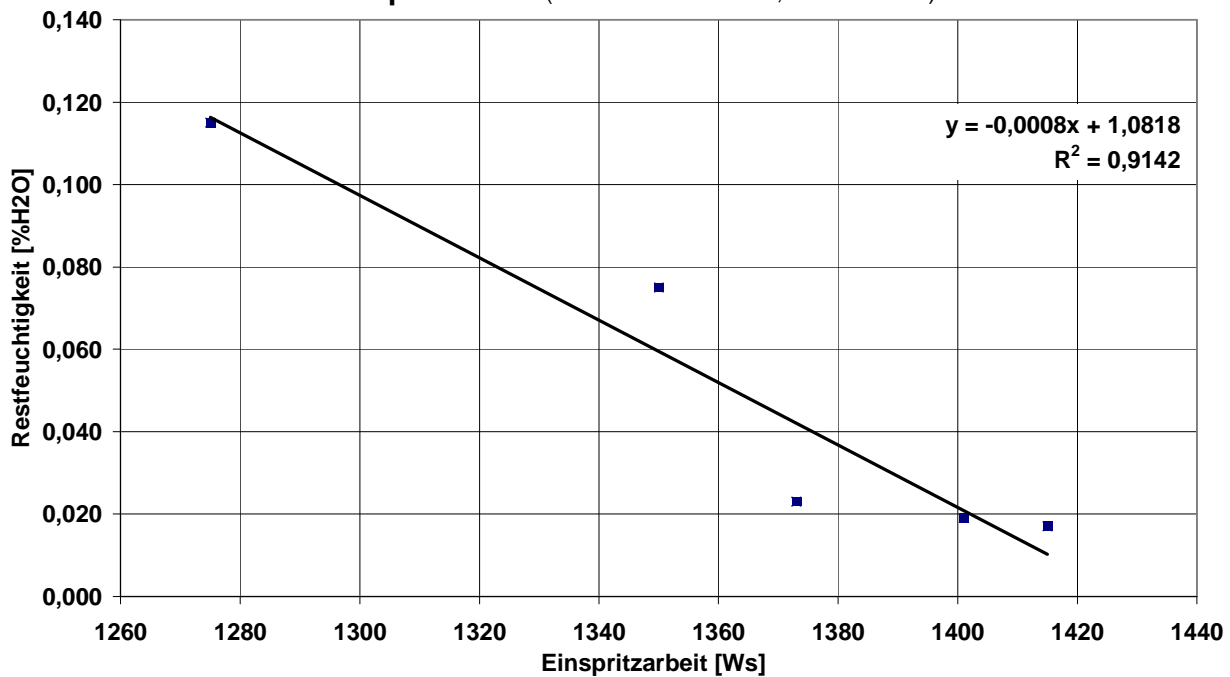


Abbildung 3-11: Regressionsrechnung mit Restfeuchtigkeitsgehalt und Einspritzarbeit (Elektra 100, Material PBT)

Schneckenposition und Einspritzmotormoment (Einspritz- Nachdruckphase)

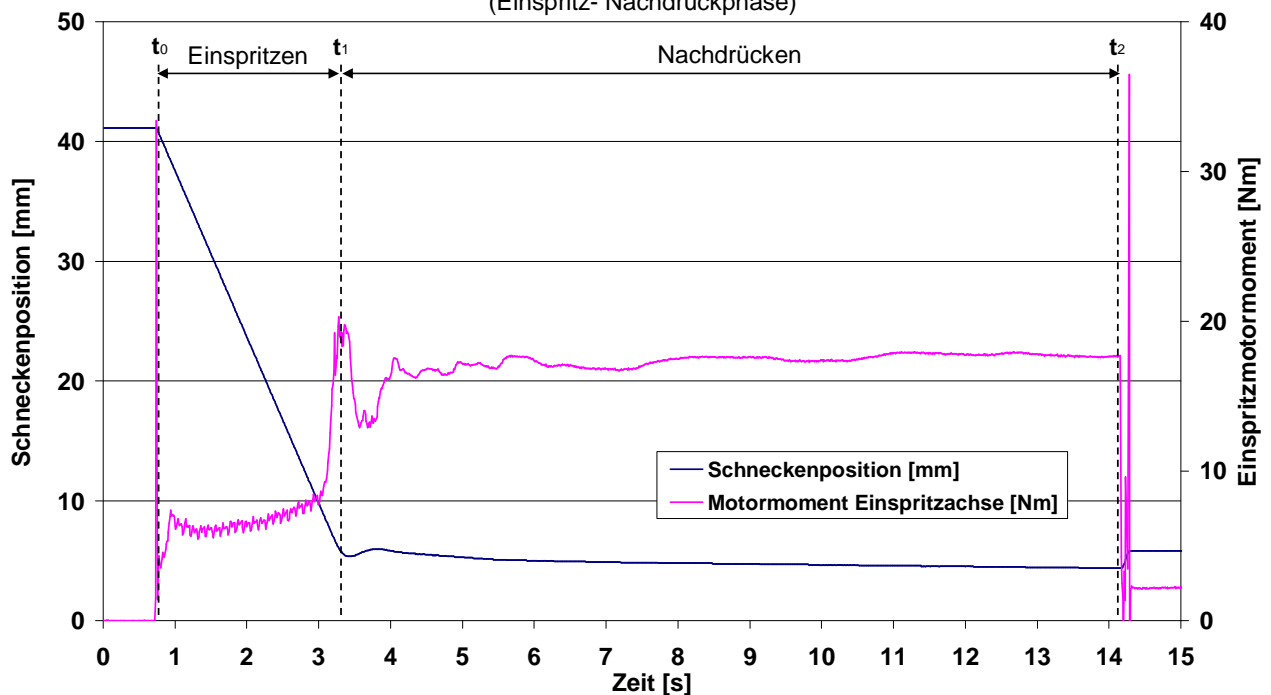


Abbildung 3-12: Schneckenposition und Einspritzmotormoment der Einspritz- und Nachdruckphase

Der Formfüllvorgang wird in zwei Phasen unterteilt, für die jeweils ein separater Parameter ermittelt wird. Für den Bereich von Beginn der Einspritzphase bis zum Erreichen des Umschaltpunktes wird nach Formel 3-2 die Füllarbeit FA_{Motor} berechnet. Sie stellt die zeitliche Integration des Einspritzmotormomentes M_E , errechnet über die interne Berechnungsmethodik des Frequenzumrichters, multipliziert mit der Drehzahl in der Einspritzphase dar. Die Füllarbeit korreliert stark mit der Fließfähigkeit der verarbeiteten Polymerschmelze.

$$FA_{Motor} = \int_{t_0}^{t_1} n \cdot M_E dt \quad \text{Formel 3-2}$$

Eine steigende Viskosität des Polymers wird in der geschwindigkeitsgeregelten Einspritzphase zu höheren Motormomenten führen, womit dann der Wert der Füllarbeit steigt. Diese Annahme gilt grundsätzlich für die verschiedenen Umschaltvarianten in die Nachdruckphase (weg-, zeit-, druckgesteuert). Kommt es dagegen bei spritzdruck- oder werkzeuginnendruckabhängigem Umschalten durch eine Viskositätsänderung zu einer Verschiebung der Umschaltposition, hat dies über die Zeit/Drehzahl einen Einfluss auf den Wert der Füllarbeit. Im Rahmen dieser Untersuchungen wird nur das positionsabhängige Umschaltverfahren eingesetzt, das Verhalten der Füllarbeit bei anderen Umschaltverfahren wird nicht untersucht.

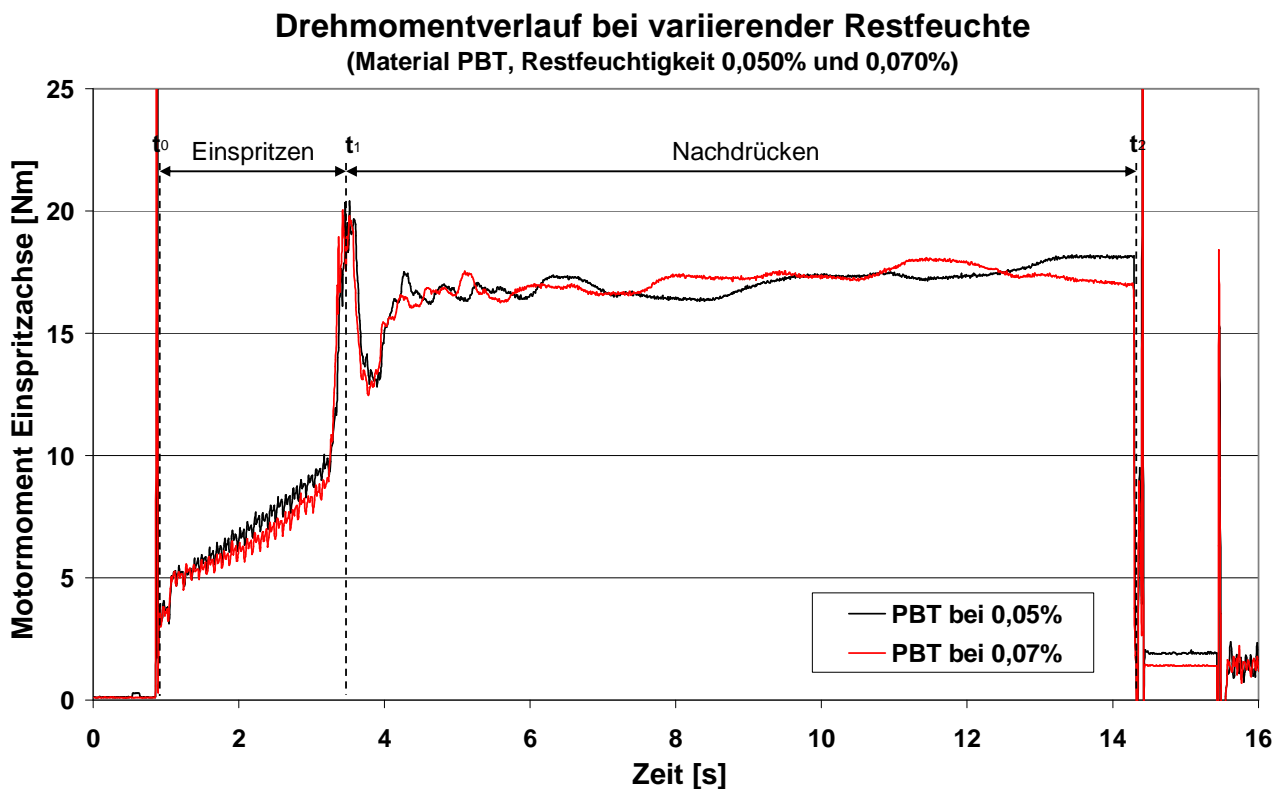


Abbildung 3-13: Drehmomentverlauf bei variierender Restfeuchte (Material PBT, Restfeuchtigkeit 0,050 % und 0,070 %)

In Abbildung 3-13 ist der Drehmomentverlauf in der Einspritz- und Nachdruckphase für ein PBT mit unterschiedlichen Restfeuchtigkeitsgehalten abgebildet. In der Formfüllphase ist der unterschiedliche Drehmomentbedarf der unterschiedlichen Feuchtigkeitsstufen deutlich sichtbar.

In der sich anschließenden Nachdruckphase wird nach Formel 3-3 ein weiterer Integralwert, die Nachdruckarbeit NA_{Motor} berechnet. Dabei wird das zeitliche Integral des Einspritzmotormomentes M_E multipliziert mit der Ist-Drehzahl über die Nachdruckdauer berechnet. Die dargestellten Drehmomentverläufe der Nachdruckphase wurden bei einer über die Nachdruckdauer konstanten Nachdruckhöhe gemessen. Die geregelte Größe in der Nachdruckphase ist die Druckkraft, die durch den Einspritzantrieb auf den Schneckenenschaft ausgeübt wird. Da die Nachdruckzeit und die Kraft konstant sind, reagiert die Nachdruckarbeit nur bei einer Abweichung im absolvierten Schneckenhub.

Die gesamte in der Einspritz- und Nachdruckphase verrichtete Arbeit des Einspritzantriebes ist die Einspritzarbeit EA_{Motor} und ist die Summe aus der Füllarbeit FA_{Motor} und Nachdruckarbeit NA_{Motor}

$$NA_{Motor} = \int_{t_1}^{t_2} n \cdot M_E dt \quad \text{Formel 3-3}$$

$$EA_{Motor} = \int_{t_0}^{t_2} n \cdot M_E dt = FA_{Motor} + NA_{Motor} \quad \text{Formel 3-4}$$

Eine Modifikation der Berechnungsmethode in Anlehnung an die Fließzahl, zu deren Berechnung ein Druckintegral über einen Ausschnitt des zurückgelegten Schneckenwegs gebildet wird, ist auch bei den hier vorgestellten Parametern möglich. Auf diese Weise ist es möglich, Bereiche mit hohen Gradienten wie den Beginn der Schneckenbewegung oder auch den Übergang von der geschwindigkeitsgeregelten Einspritzphase in die druckgeregelte Nachdruckphase aus den Integrationsgrenzen zu entfernen.

Weitere Parameter, die aus dem Motordrehmomentverlauf abgeleitet werden können, sind Maximal- und Mittelwerte der Prozessphasen. Die Maximalwerte des Einspritzmotormomentes verfügen nur über eine geringe Aussagekraft über den Prozesszustand in der Einspritzeinheit. Verursacht durch Trägheits- und Reibungseffekte im System aus Schnecke und Zylinder entstehen zu Beginn der Schneckenbewegung hohe Drehmomentspitzen, die zumeist sämtliche weiteren Belastungen überschreiten. Ferner beschleunigen elektromechanische Einspritzachsen häufig aus der Ruhelage heraus mit dem maximal möglichen Motormoment des Antriebes, was einer Auswertung der Maximalwerte ebenfalls entgegensteht. Die Mittelwerte des Einspritzmotormomentes in den verschiedenen Prozessphasen lassen sich zur Charakterisierung des Prozesses wiederum gut einsetzen.

In der Plastifizierphase wird über das Motormoment des Einspritzantriebes das eingestellte Staudruckniveau realisiert. Durch die Rotation der Schnecke wird die Schmelze in den

Schneckenraum gefördert, so dass sich dort ein Druck aufbaut. Sobald die sich ergebende Rückdruckkraft größer als die Reibung im System ist, wird die Schnecke im Zylinder zurückgedrückt. Bei der Verarbeitung von technischen Thermoplasten sind die erforderlichen Staudrücke so hoch, dass der Einspritzantrieb aktiv eine Gegenkraft aufbringt.

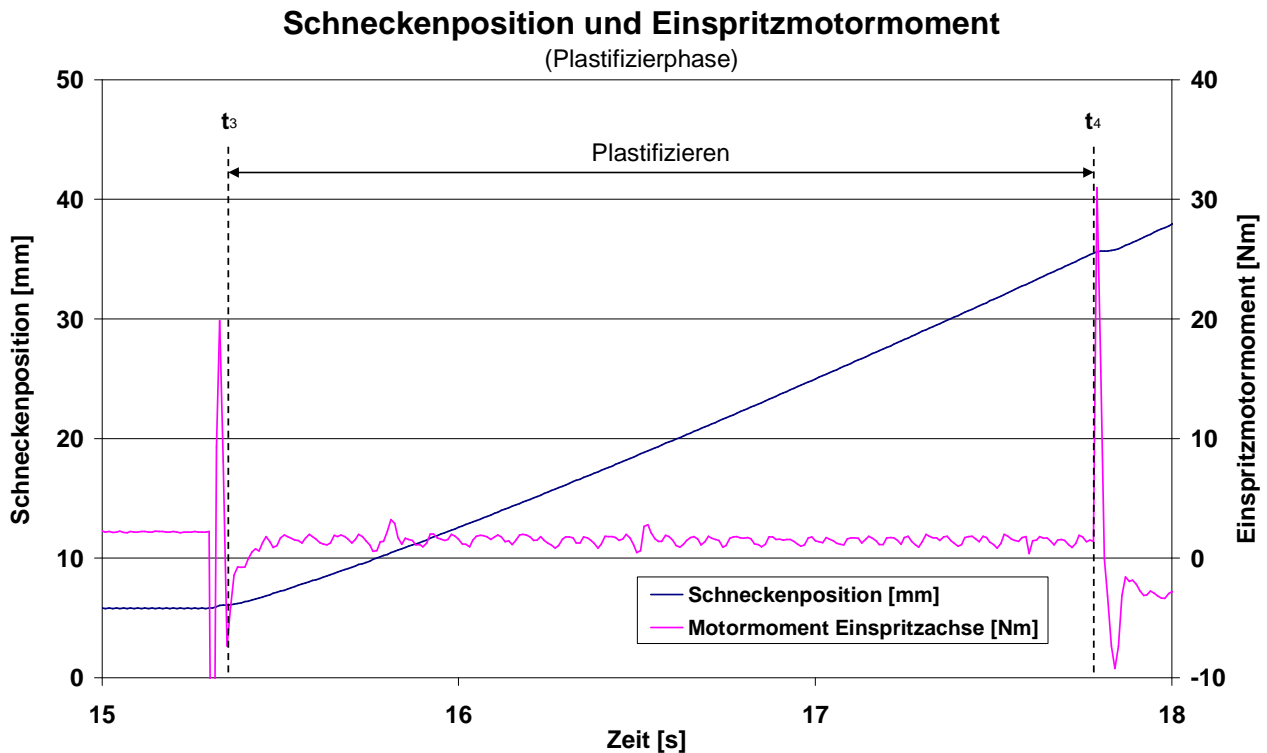


Abbildung 3-14: Schneckenposition und Einspritzmotormoment in der Plastifizierphase

Abbildung 3-14 zeigt den Verlauf des Drehmomentes des Einspritzantriebs in der Plastifizierphase; dabei ist am Anfang (direkt nach t_3) kurz ein negatives Drehmoment zu erkennen, was durch ein aktives Zurückziehen der Schnecke entsteht. Im Verlauf der Plastifizierphase schwankt das Motormoment um einen Mittelwert von 1,7 Nm, wobei die Schwankungen auf ein pulsierendes Förderverhalten der Schnecke zurückzuführen sind.

Wie zuvor bei den Integralwerten für die Einspritz- und Nachdruckphase wird auch für die Plastifizierphase die eingebrachte Arbeit der Antriebsachse nach Formel 3-5 in Form einer Staudruckarbeit SA_{Motor} berechnet.

$$SA_{Motor} = \int_{t_3}^{t_4} n \cdot M_E dt \quad \text{Formel 3-5}$$

Bei allen Informationen, die aus dem Antriebssystem stammen, ist der Betriebszustand des Gesamtsystems zu beachten. In der Wirkkette, wie in Abbildung 3-9 dargestellt, vom Frequenzumrichter und dem elektrischen Motor über die Getriebestufe mit der Transformation der rotatorischen in eine lineare Bewegung, können verschiedene Faktoren die Er-

gebnisse beeinflussen. Der Frequenzumrichter selbst unterliegt zwar keinen Warmlaufeffekten, jedoch unterliegt die Berechnung des internen Motordrehmomentes z.B. einer Ungenauigkeit, die durch die Erwärmung des Elektromotors und der damit verbundenen abgewandelten Leistungscharakteristik. Hierdurch kann es in der Anlaufphase des Prozesses zu Abweichungen kommen, die nicht mit dem Prozessverhalten korrelieren. Dieser Effekt ließe sich wie in [PA06] beschrieben, über eine die aktuelle Motortemperatur berücksichtigende Berechnungsvorschrift kompensieren. Einen weiteren Einflussfaktor stellen die mechanischen Elemente des Achsantriebs dar. Ebenfalls durch Erwärmungseffekte ergeben sich abweichende Reibungsverluste und abweichende Elastizitäten, die sich auf die Steifigkeit des Antriebs auswirken.

In Tabelle 3-1 sind alle Prozessparameter, die aus dem Ist-Moment der Einspritzachse berechnet werden, dargestellt.

Tabelle 3-1: Zusammenstellung der Prozessparameter der Einspritzachse

Bezeichnung	Einheit	Messstelle	Messzeit
Mittleres Drehmoment Einspritzen	Nm	FU-Einspritzachse	Einspritzphase
Maximales Drehmoment Einspritzen	Nm	FU-Einspritzachse	Einspritzphase
Füllarbeit (Drehmoment) [Formel 3-2]	Ws	FU-Einspritzachse	Einspritzphase
Mittleres Drehmoment Nachdrücken	Nm	FU-Einspritzachse	Nachdruckphase
Maximales Drehmoment Einspritzen	Nm	FU-Einspritzachse	Nachdruckphase
Nachdruckarbeit (Drehmoment) [Formel 3-3]	Ws	FU-Einspritzachse	Nachdruckphase
Mittleres Drehmoment Plastifizieren	Nm	FU-Einspritzachse	Plastifizierphase
Maximales Drehmoment Plastifizieren	Nm	FU-Einspritzachse	Plastifizierphase
Staudruckarbeit (Drehmoment) [Formel 3-5]	Ws	FU-Einspritzachse	Plastifizierphase
Einspritzarbeit (Drehmoment) [Formel 3-4]	Ws	FU-Einspritzachse	Einspritz- und Nachdruckphase

Eine Anwendung der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Prozessparameter auf andere Achsen von Spritzgießmaschinen, wie z.B. der Werkzeug- oder Auswerferachse, ist möglich, wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht vorgenommen.

3.2.3 Arbeitsparameter des Plastifizierantriebstranges

Die Plastifizierachse an Spritzgießmaschinen verrichtet die rotatorische Schneckenbewegung, die zum Plastifizieren des Polymers notwendig ist. Die derzeit am häufigsten angewendete Konfiguration einer Plastifizierachse an Spritzgießmaschinen ist in Abbildung 3-15 dargestellt. Ein Frequenzumrichter steuert einen Servomotor an, der über ein Getriebe gekoppelt, die Schnecke antreibt. Die Getriebefunktion übernehmen heute hauptsächlich Riemenübersetzungen.

Die Sollwertvorgabe, die der Maschinenbediener entsprechend den Prozessanforderungen und dem verarbeiteten Rohstoff anpasst, ist die Schneckendrehzahl. Diese wird dann entsprechend über den Frequenzumrichter am Servomotor eingestellt, wobei sich das notwendige Motordrehmoment einstellt. Ist das voreingestellte Dosiervolumen erreicht, wird die Schneckenrotation gestoppt.

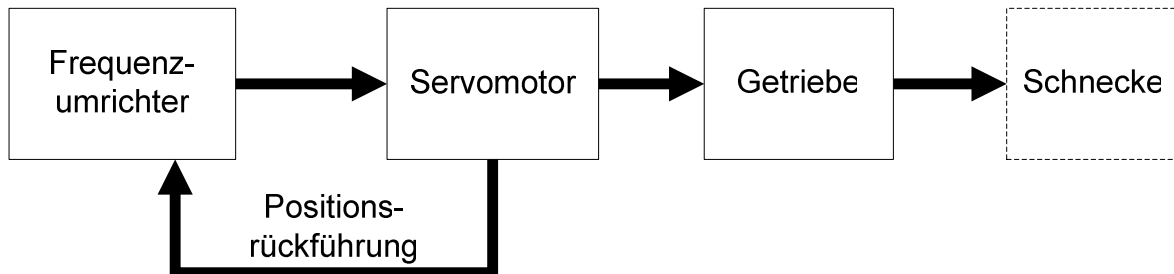


Abbildung 3-15: Komponenten und Messwertrückführung einer Plastifizierachse an Spritzgießmaschinen

Im seltenen Fall wird der Plastifizier-Sollwert in Form eines Schneckendrehmomentes vorgegeben. Hintergrund ist, unabhängig von der aktiv wirkenden Schneckenlänge, einen gleichmäßigen Energieeintrag in die Schmelze zu erreichen. In diesen Fällen wird sich dann entsprechend die Drehzahl dem Betriebspunkt anpassen.

In Abbildung 3-16 ist das Motormoment der Plastifizierachse der Versuchsmaschine dargestellt.

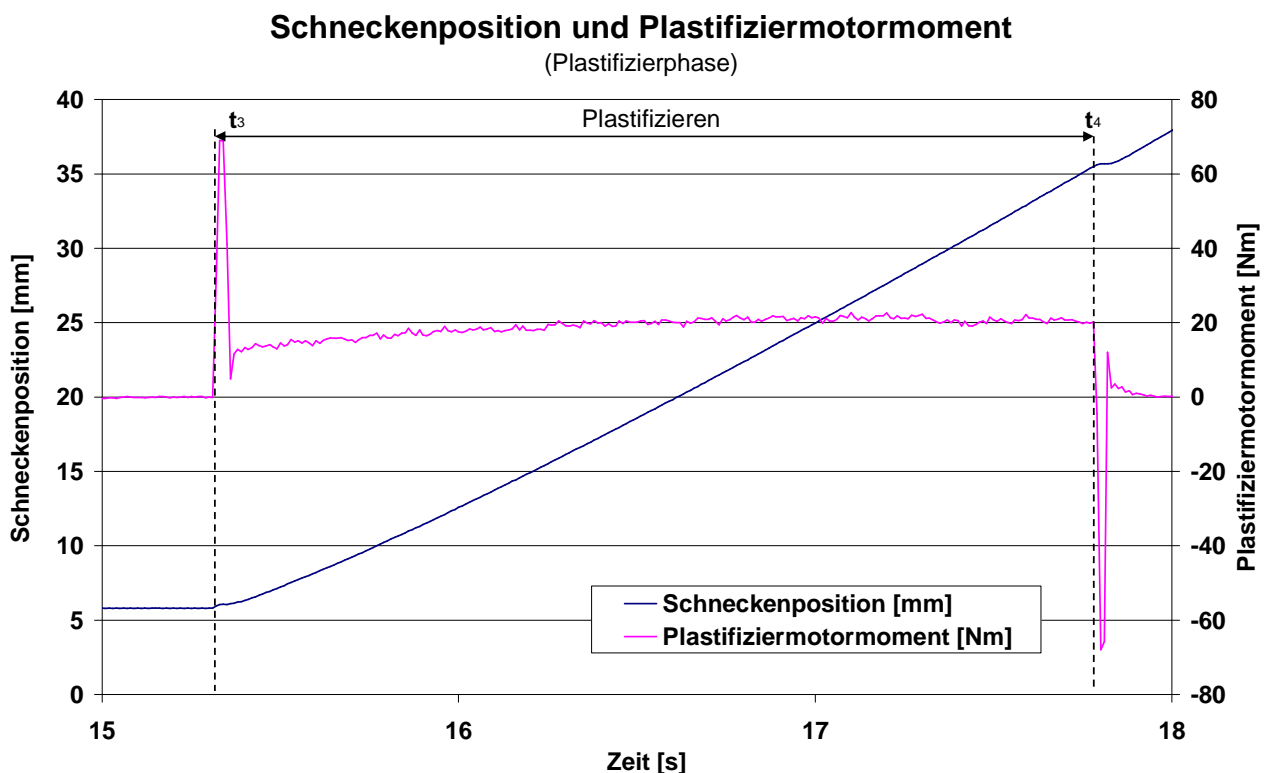


Abbildung 3-16: Schneckenposition und Plastifiziermotormoment

Zu Beginn bzw. am Ende der Schneckenrotation ist eine Drehmomentspitze von jeweils ca. 70 Nm zu sehen. Bei konstanter Drehgeschwindigkeit steigt das Motormoment langsam auf einen Wert von ca. 20 Nm an. Die angegebenen Zeitpunkte t_3 und t_4 erfolgen in Fortführung der Zeitmarken, die bereits zur Berechnung der Parameter der Einspritzachse verwendet wurden.

Neben der verwendeten Schneckengeometrie und der Ausführung der Rückströmsperre (Druckverlustbeitrag) ist das Plastifiziermotormoment im Wesentlichen durch zwei Einflüsse bestimmt. Zum einen ist das Moment vom Staudruck und der Drehgeschwindigkeit abhängig. Weiterhin ist das Plastifiziermotormoment stark vom verarbeiteten Polymer und dessen Plastifizier- und Fließverhalten abhängig. So stellt sich schon bei leichten Änderungen in der Viskosität, wie sie z.B. durch schwankende Restfeuchtigkeitsgehalte verursacht werden können, ein abweichendes Drehmoment ein. Das Drehmoment der Plastifizierachse reagiert sensibel auf Viskositätsschwankungen und kann sehr gut als Indikator für eine Änderung der Fließfähigkeit des verarbeiteten Rohstoffes verwendet werden.

In Anlehnung an die Berechnung der Energieparameter der Einspritzachse werden auch für die Plastifizierachse zwei spezielle Prozessparameter berechnet. Nach Formel 3-6 wird die Plastifizierarbeit PA_{Motor}^I ermittelt, dabei handelt es sich um das zeitliche Integral der Leistung des Plastifizierantriebs. Die Plastifizierarbeit entspricht der Energie, die durch den Plastifizierantrieb in das System eingebracht wird.

$$PA_{Motor}^I = \int_{t_3}^{t_4} n \cdot M_P dt \quad \text{Formel 3-6}$$

Addiert man zur Plastifizierarbeit noch die Staudruckarbeit, die sich nach Formel 3-5 berechnet, erhält man die Plastifizierarbeit PA_{Motor}^{II} .

$$PA_{Motor}^{II} = \int_{t_3}^{t_4} n \cdot M_P dt + \int_{t_3}^{t_4} n \cdot M_E dt = PA_{Motor}^I + SA_{Motor} \quad \text{Formel 3-7}$$

Weiterhin werden für die Plastifizierachse die maximalen und mittleren Drehmomente ermittelt. Die Maximalwerte werden, wie zuvor bereits an der Einspritzachse, durch die auftretenden Drehmomentspitzen überlagert und sind zur Prozessüberwachung nur bedingt geeignet.

In Tabelle 3-2 sind alle Prozessparameter, die aus dem Ist-Motormoment des Plastifizierantriebes berechnet werden, dargestellt.

Tabelle 3-2: Zusammenstellung der Prozessparameter der Plastifizierachse

Bezeichnung	Einheit	Messstelle	Messzeit
Mittleres Drehmoment Plastifizieren	Nm	FU-Plastifizierachse	Plastifizierphase
Maximales Drehmoment Plastifizieren	Nm	FU-Plastifizierachse	Plastifizierphase
Plastifizierarbeit (Drehmoment) [Formel 3-6]	Ws	FU-Plastifizierachse	Plastifizierphase
Plastifizierarbeit 2 (Drehmoment) [Formel 3-7]	Ws	FU-Plastifizierachse	Plastifizierphase

Eine Anwendung der im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Prozessparameter auf andere Achsen von Spritzgießmaschinen wie z.B. der Werkzeug- oder Auswerferachse ist möglich, wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht vorgenommen.

3.2.4 Arbeitsparameter aus der Druck- und Kraftmessung

Neben der Berechnung von energiebezogenen Prozessparametern aus dem Drehmoment der jeweiligen Achsantriebe, lässt sich der Energieeintrag in den Prozessphasen ebenfalls über die Druck- bzw. Kraftmesstechnik der Spritzgießmaschine ermitteln.

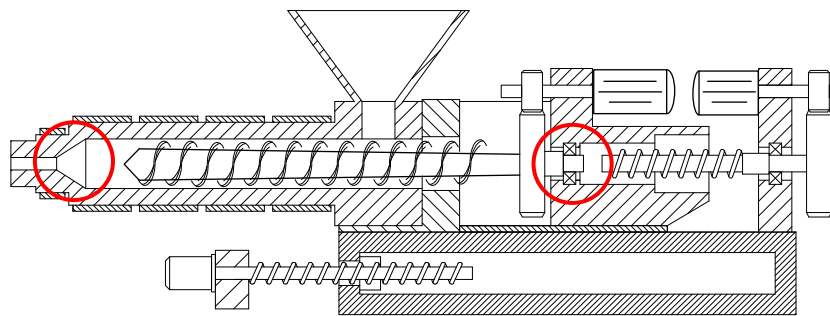


Abbildung 3-17: Einspritzeinheit mit den Messstellen des Spritzdrucks im Schneckenorraum und am Schneckenschafft

Alle elektromechanischen Einspritzeinheiten sind zur Messung des aktuellen Spritzdrucks mit Sensorik ausgerüstet. Die Standard-Konfiguration zur Erfassung des Spritzdrucks ist dabei eine Kraftmessung zwischen dem Schneckenschafft und der Antriebseinheit (siehe Abbildung 3-17 rechts). Dabei wird die Kraft gemessen, die die Antriebseinheit auf die Schnecke aufbringt. Über die Schneckenstirnfläche wird diese Kraft in einen Druckwert umgerechnet. Die Erfassung des resultierenden Drucks „hinter“ der Schnecke ist bei der Bewertung der Messdaten sehr wichtig. So führt eine Verringerung in der Viskosität des verarbeiteten Polymers z.B. zu verringerten Reibungsverlusten im Einspritzzylinder und damit zur besseren Druckübertragung über die Schneckenlänge. Wird der Staudruck an einer Spritzgießmaschine über die Kraftmesszellen am Schneckenschafft geregelt, stellt sich bei einer Viskositätsänderung des Polymers bei ansonsten unveränderter Maschineneinstellung ein unterschiedlicher Staudruck im Schneckenorraum ein.

Aus Abbildung 3-18 ist der Effekt einer gesteigerten Reibung im Spritzzylinder ersichtlich. Dargestellt ist der mittlere Staudruck in der Plastifizierphase, gemessen im Schneckenorraum. Dabei regelt die Steuerung der Maschine über die gesamte Versuchsdauer einen konstanten Staudruck von 50 bar, der mittels einer Kraftmesszelle am Schneckenschaft gemessen wird. Nach dem Wechsel auf trockeneres Rohmaterial steigt, nach einer Verzögerung, die der Spülzeit des Systems entspricht, der mittlere Staudruck um ca. 10 bar an. Die Variation des Restfeuchtigkeitsgehaltes verursacht eine Steigerung des real erreichten Staudrucks um 20 %.

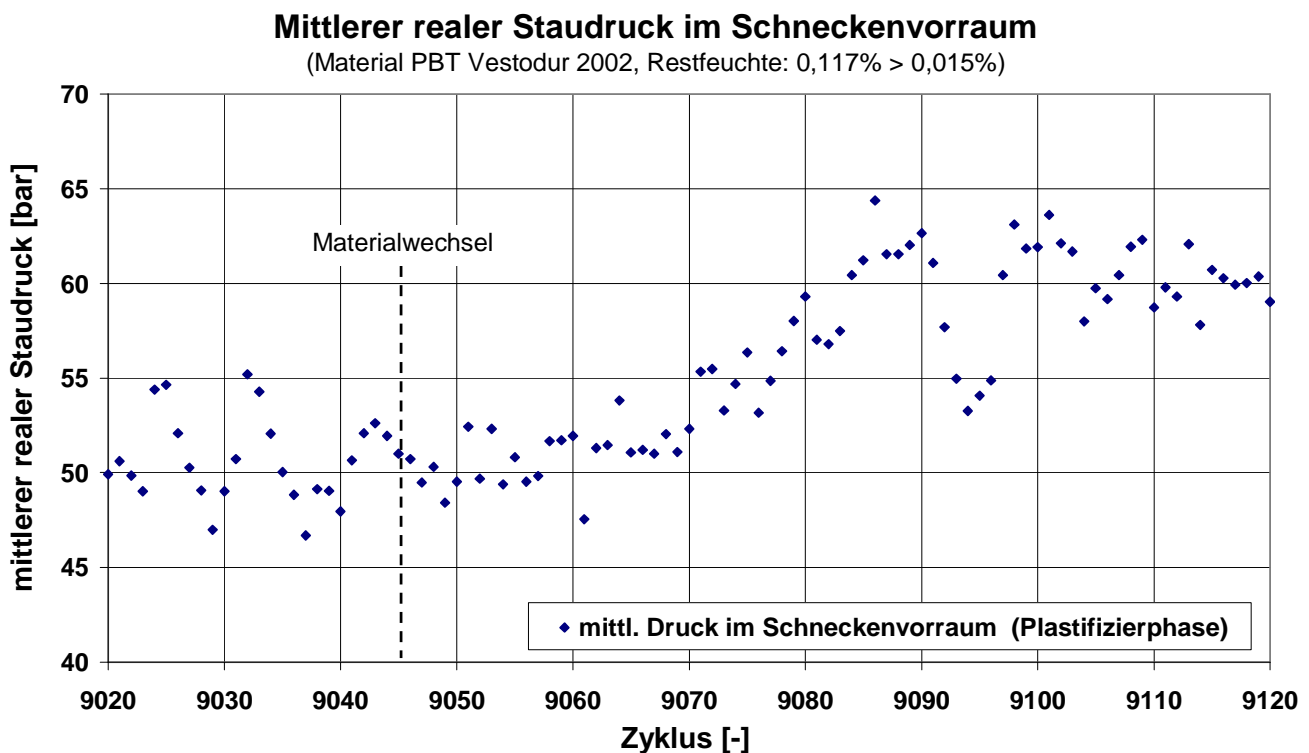


Abbildung 3-18: Mittlerer realer (Regelgröße ist die Kraft am Schneckenschaft) Staudruck im Schneckenorraum bei Variation des Restfeuchtigkeitsgehaltes

Selten sind Spritzgießmaschinen mit einem Schmelzedrucksensor im Schneckenorraum ausgestattet (siehe Abbildung 3-17 links), der eine direktere Druckmessung als die Variante über eine Kraftmessstelle am Schneckenschaft ermöglicht. Die Versuchsmaschine bot ebenfalls diese Möglichkeit, so dass in der Versuchsreihe das Drucksignal des Schneckenorraumdruckes ebenfalls zur Berechnung von Prozesskennzahlen herangezogen wurde. (Bei den Versuchen zur Prozessregelung wurden die entsprechenden Kennzahlen jedoch nicht zur Modellbildung zugelassen.)

Verarbeitet man die Kraft- und Drucksignale der beiden Messstellen in Anlehnung an die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Prozessparameter, lassen sich auf Basis der Druckverläufe die in Tabelle 3-3 aufgelisteten Parameter ermitteln.

Tabelle 3-3: Zusammenstellung der Prozessparameter aus der Druck- und Kraftmessung

Bezeichnung	Einheit	Messstelle	Messzeit
Füllarbeit (Spritzdruck) [Formel 3-8]	Ws	Kraftmesszelle	Einspritzphase
Nachdruckarbeit (Spritzdruck) [Formel 3-9]	Ws	Kraftmesszelle	Nachdruckphase
Einspritzarbeit (Spritzdruck) [Formel 3-10]	Ws	Kraftmesszelle	Einspritz- und Nachdruckphase
Füllarbeit (Düsendruck)	Ws	Düsendrucksensor	Einspritzphase
Nachdruckarbeit (Düsendruck)	Ws	Düsendrucksensor	Nachdruckphase
Einspritzarbeit (Düsendruck)	Ws	Düsendrucksensor	Einspritz- und Nachdruckphase

Bei den berechneten Kennzahlen handelt es sich um Energien, die dem Prozess zugeführt werden. Zur Berechnung werden die Messwerte, die an einer Spritzgießmaschine als Druckwert (in bar) vorliegen, über die Schneckenstirnfläche in eine entsprechende Kraft umgerechnet.

$$FA_{KMD} = \int_{t_0}^{t_1} \Delta s \cdot F_{KMD} dt \quad \text{Formel 3-8}$$

$$NA_{KMD} = \int_{t_1}^{t_2} \Delta s \cdot F_{KMD} dt \quad \text{Formel 3-9}$$

$$EA_{KMD} = \int_{t_0}^{t_1} \Delta s \cdot F_{KMD} dt + \int_{t_1}^{t_2} \Delta s \cdot F_{KMD} dt = FA_{KMD} + NA_{KMD} \quad \text{Formel 3-10}$$

Die Füllarbeit FA_{KMD} berechnet sich nach Formel 3-8 aus der an den Kraftmessdose „KMD“ wirkenden Kraft multipliziert mit der inkrementell zurückgelegten Wegdifferenz. Das Produkt wird dann über die Dauer der Prozessphase integriert. Entsprechend wird die Nachdruckarbeit NA_{KMD} in Formel 3-9 sowie die Einspritzarbeit EA_{KMD} nach Formel 3-10 als Summe berechnet.

Die Kennzahlen aus der Druck- und Kraftmessung in der Plastifizierphase werden entsprechend berechnet. Weiterhin wurden die zuvor dargestellten Prozesskennzahlen auch für die Druckmessstelle im Schneckenorraum ($p_{düse}$) berechnet.

In Abbildung 3-19 sind zwei typische Kraftverläufe aus der Einspritz- und Nachdruckphase dargestellt, die jeweils bei verschiedenen Restfeuchtegehalten (0,07 % und 0,05 %) aufgezeichnet wurden. Der abweichende Kraftverlauf in der Einspritzphase ist auf die Unterschiede in der Fließfähigkeit des Polymers zurückzuführen, in der Nachdruckphase ist der Kraft- bzw. Druckwert dann die geregelte Größe und die Verläufe sind deckungsgleich.

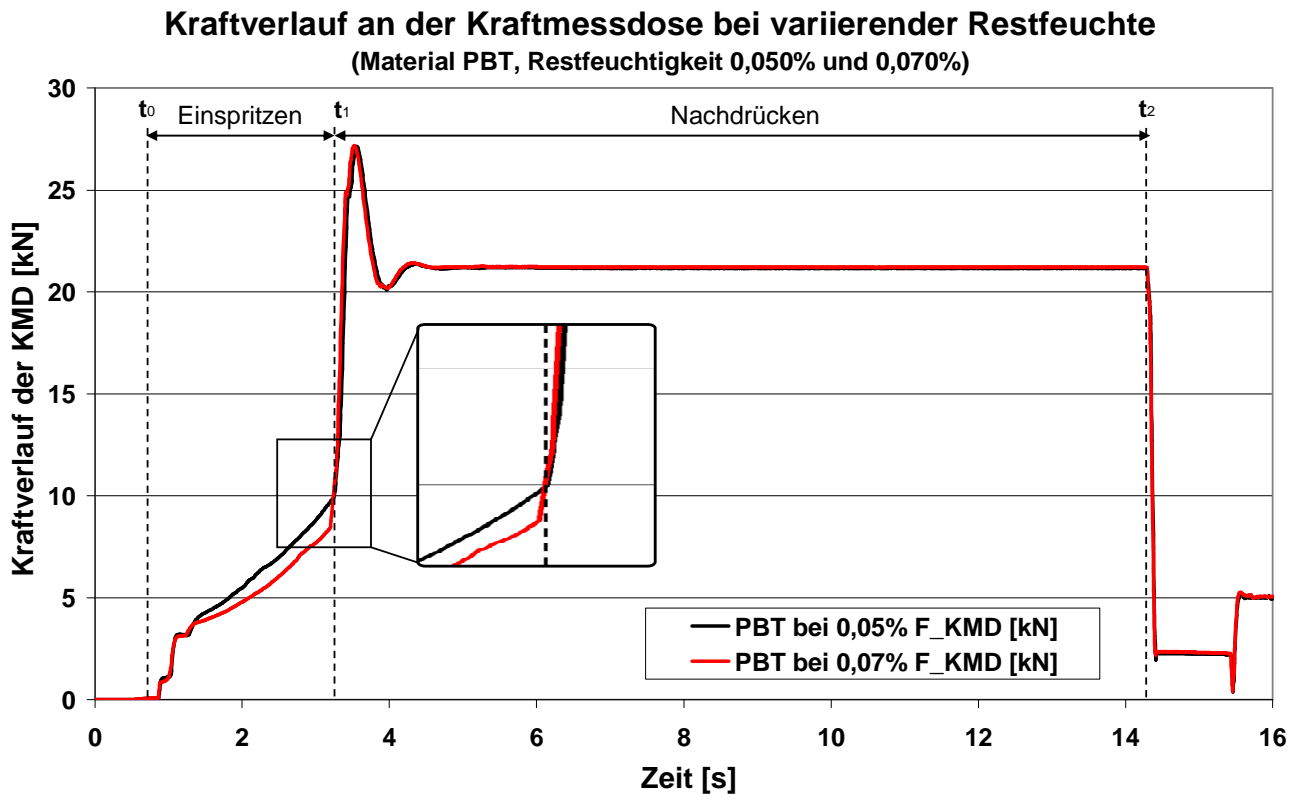


Abbildung 3-19: Kraftverlauf an der Kraftmesszelle bei variierender Restfeuchte im Polymer (PBT)

Hervorzuheben ist weiterhin der etwas frühere Druckanstieg am Ende der Einspritzphase (siehe Ausschnitt). Dieses Verhalten ist auf ein schnelleres Schließen der Rückströmsperre bei niedrigviskoser Schmelze zurückzuführen, eine Erklärung dieses Effektes findet sich in Kapitel 4.5.1. Die durch diesen Effekt verursachten Änderungen im Formteil werden zu großen Teilen durch die druckgeführte Nachdruckphase kompensiert.

3.2.5 Integrale Prozessparameter der Einspritzeinheit und des Werkzeuges

Neben den verschiedenen energiebezogenen Prozessparametern werden im Rahmen dieser Arbeit auch verschiedene Integralwerte verwendet. Wird bei den Energieparametern die jeweils wirkende Kraft entlang einer Wegstrecke über die Zeit integriert, so entfällt bei den reinen Integralwerten die Positionsänderung als Einflussfaktor. Wird nur die geschwindigkeitsgeregelte Einspritzphase betrachtet, ergeben sich dadurch keine bedeutsamen Unterschiede. Die Regelabweichungen der Geschwindigkeitsregelung in der Einspritzphase an aktuellen, elektromechanisch angetriebenen Spritzgießmaschinen sind sehr gering.

In Abbildung 3-20 ist die Füllarbeit sowie das Einspritzdruckintegral (ohne Nachdruckphase) aus einem Versuch mit einer Restfeuchtigkeitsvariation dargestellt. Grundlage der Parameter ist jeweils der Druckverlauf, gemessen an der Kraftmessdose am Schnecken-schaft. Beide Prozessparameter liegen auf einem ähnlichen Niveau und zeigen eine übereinstimmende Reaktion auf die Änderung des Restfeuchtegehaltes im Rohmaterial.

Liegen die Werte beider Parameter zu Beginn bei ca. 210 [Ws, bars] steigen beide nach dem Wechsel auf weniger feuchtes Rohmaterial analog um ca. 14 % an.

Vergleich von Füllarbeit KMD und Einspritzdruckintegral KMD

(Material PBT Vestodur 2002, Restfeuchte: 0,119% > 0,067%)

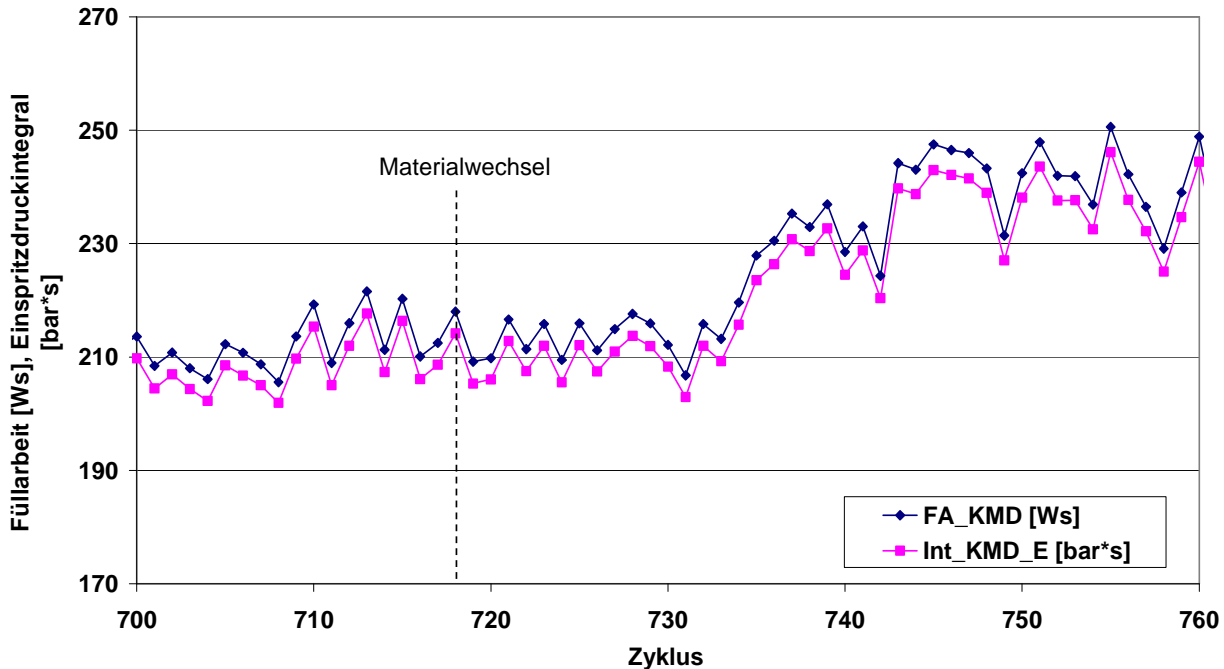


Abbildung 3-20: Vergleich von Füllarbeit und Einspritzdruckintegral auf Basis der Messwerte der Kraftmessdose am Schneckenschaft

Vergleich von Nachdruckarbeit KMD und Nachdruckintegral KMD

(Material PBT Vestodur 2002, Restfeuchte: 0,119% > 0,067%)

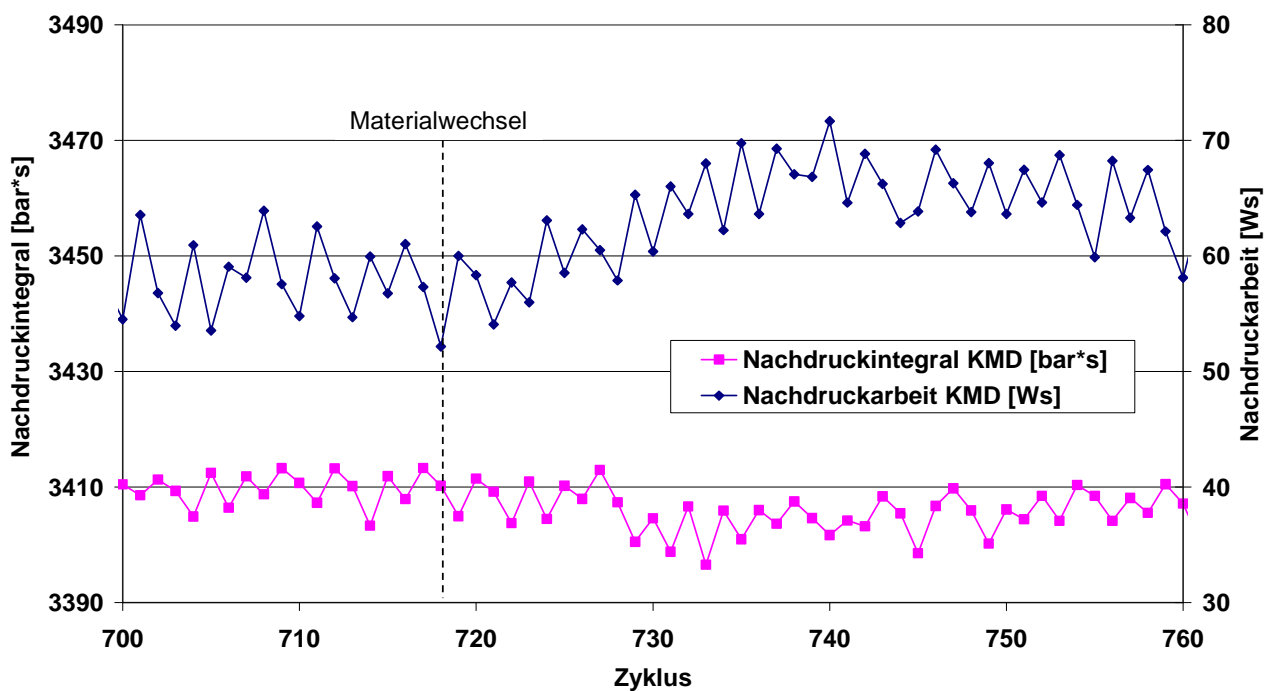


Abbildung 3-21: Vergleich von Nachdruckarbeit und Nachdruckintegral auf Basis der Messwerte der Kraftmessdose am Schneckenschaft

In der druckgeführten Nachdruckphase kommt es durch die Änderung in der Fließfähigkeit zu abweichenden Positionsverläufen der Schnecke nach dem Materialwechsel, was die berechneten Parameter beeinflusst. In Abbildung 3-21 sind die Nachdruckarbeit sowie das Nachdruckintegral einer Versuchsreihe dargestellt. Beide Parameter werden auf Basis der Kraftmessung in der Kraftmessdose am Schneckenschaft berechnet. Simuliert wird ein Wechsel des Restfeuchtigkeitsgehaltes, der zu einer erhöhten Viskosität des verarbeiteten Materials führt. Diese Störung im Prozess führt bei dem Nachdruckintegral zu einer geringfügigen Absenkung (weit unter 1 %) des Parameters, der aus dem geänderten Druckniveau zum Zeitpunkt des Umschaltens auf Nachdruck resultiert. Im gleichen Zeitraum steigt der Energieparameter um rund 12 % an. Zur korrekten Bewertung und Interpretation von verschiedenen Prozessparametern ist es immer notwendig, auch den zugrundeliegenden Prozess und dessen Regelung zu beachten.

Die integralen Parameter werden, wie zuvor die Arbeitsparameter schon, für die verschiedenen Messstellen von Druck- und Kraftverläufen und die Prozessphasen berechnet. In der Spritzgießbranche allgemein bekannte Integralwerte sind die Fließzahl oder das Werkzeuginnendruckintegral. Das Werkzeuginnendruckintegral I_E^{Wi} stellt die zeitliche Integration des Werkzeuginnendruckverlaufes in der Einspritzphase dar, wobei der Werkzeuginnendrucksensor in einer angussnahen Position zu positionieren ist.

$$I_E^{Wi} = \int_t^{t_{Füll}} p_{Wi} dt \quad \text{Formel 3-11}$$

Die Integrationsgrenzen werden für jeden Zyklus aus einer Steigungsüberwachung gewonnen. Die Integration startet sobald der Werkzeuginnendrucksensor den ersten Druckanstieg registriert. Die obere Integrationsgrenze bildet der zur volumetrischen Füllung des Werkzeuges erforderliche Fülldruck. Die Bestimmung des Fülldruckes erfolgt ebenfalls über eine Steigungsüberwachung, die den schnellen Druckanstieg zwischen Füll- und Kompressionsphase ermittelt [Ca05].

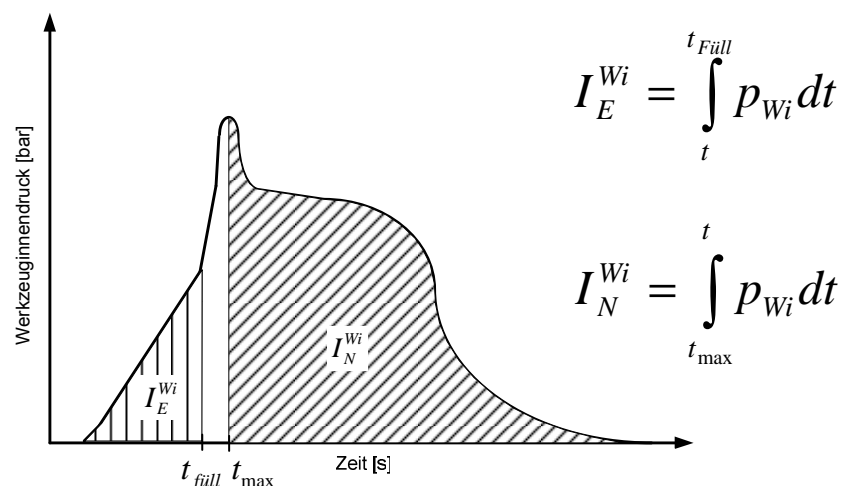


Abbildung 3-22: Berechnung des Werkzeuginnendruckintegrals in Einspritz- und Nachdruckphase

Das Werkzeuginnendruckintegral korreliert mit der Fließfähigkeit des verarbeiteten Polymers. Bei erhöhter Viskosität steigt der Druckbedarf zum Füllen der Kavität, was sich in steigenden Werkzeuginnendruckintegralen in der Einspritzphase zeigt.

Das Nachdruckintegral I_N^{Wi} wird über den Werkzeuginnendruckverlauf in der Nachdruckphase gebildet. Die Integration startet nach Erreichen des Druckmaximums nach der Kompressionsphase und endet in der Regel am Ende der eingestellten Nachdruckzeit.

$$I_N^{Wi} = \int_{t_{\max}}^t p_{Wi} dt \quad \text{Formel 3-12}$$

Das Nachdruckintegral ist stark von der Einspritz- und Kompressionsphase abhängig, so dass eine sinnvolle Bewertung eines veränderten Nachdruckintegralwertes nur im Zusammenhang mit anderen Prozesskennzahlen vorgenommen werden kann [Bi94]. Das Nachdruckintegral korreliert direkt mit dem in der Kavität realisierten Druckniveau in der Nachdruckphase. Dieses wird durch das Druckübertragungsverhalten von der Kraftmessdose der Einspritzeinheit über die Schnecke und den Schneckenorraum bis hin zum Werkzeugdrucksensor bestimmt. Bei steigender Schmelzeviskosität nehmen die Reibungsverluste an den Grenzflächen sowie die innere Reibung des Polymers zu und es wird weniger Druck übertragen.

Neben dem Werkzeuginnendruckintegral wird häufig die Fließzahl verwendet. Diese ist zwar nicht wie das Werkzeuginnendrucksignal unabhängig von der verwendeten Spritzgießmaschine, kann jedoch ohne zusätzliche Drucksensorik im Werkzeug berechnet werden. Aufgrund der hohen Investitionen werden Werkzeuginnendrucksensoren nur in wenigen Fällen eingesetzt. Zur Berechnung der Fließzahl nach Formel 3-13 werden die Standard Drucksensoren (Kraftmessdose am Schneckenschaft) der Spritzgießmaschine verwendet.

$$FZ_{KMD} = \int_{t_1}^{t_2} p_{KMD} dt \quad \text{Formel 3-13}$$

Die Besonderheit der Fließzahl ist, dass zur Berechnung ein Bereich aus dem Druckverlauf in der Einspritzphase ausgewählt wird.

Dies hat den Hintergrund, die bei der Beschleunigung bzw. bei dem Abbremsen am Umschalt Punkt auftretenden Streueffekte nicht mit in die Betrachtung einzubeziehen. Druckspitzen wie sie z.B. am Beginn der Einspritzphase durch erstarrte Pfropfen in der Düse oder durch einen nicht reproduzierbar angesteuerten Umschalt Punkt verursacht werden, haben keinen störenden Einfluss auf den Wert der Fließzahl.

Die Integrationsgrenzen der Fließzahlberechnung können, wie in Abbildung 3-23 dargestellt, entweder über einen festen Zeitraum im Zyklus oder über den entsprechenden Abschnitt des Schneckenweges festgelegt werden. Die Fließzahl wird nur für den Einspritz-

vorgang ermittelt, da in der Nachdruckphase der zugrundeliegende Druck die geregelte Größe darstellt und somit unabhängig von den Fließeigenschaften des Polymers ist.

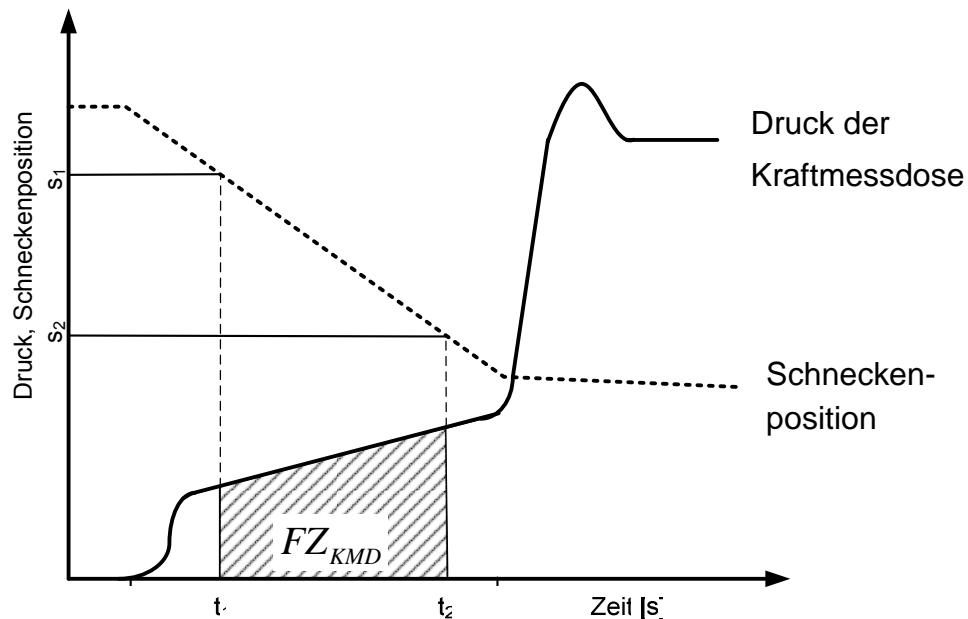


Abbildung 3-23: Berechnung der Fließzahl über einen Zeit- oder Schneckenpositionsbereich

Im Rahmen dieser Arbeit werden weitere integrale Kennzahlen für die verschiedenen Prozessphasen und Messstellen von Parametern wie in Tabelle 3-4 dargestellt ermittelt. Neben dem Werkzeuginnendruckintegral und der Fließzahl werden noch die Druckintegrale der Messstellen Schneckenorraum und Kraftmessdose gebildet. Dabei werden die Integrationsgrenzen entsprechend denen bei der Berechnung der Energieparameter gesetzt.

Neben den Druckverläufen werden auch mit den Ist-Drehmomenten der Frequenzumrichter integrale Kennzahlen gebildet. Das „Drehmomentintegral (Einspritzen)“ I_E^{FU} entspricht der zeitlichen Integration des Drehmomentes M_E des elektrischen Antriebs der Einspritzachse.

$$I_E^{FU} = \int_{t_1}^{t_2} M_E dt \quad \text{Formel 3-14}$$

Steigende Viskositäten führen zu erhöhten Druckverlusten in der Formfüllphase und damit zu einem höheren Einspritzmotormoment. Abbildung 3-24 zeigt die Verläufe des Einspritzmotormoments gemessen bei konstanten Maschineneinstellungen und variierten Restfeuchtigkeitsgehalten des verarbeiteten Polymers. In der geschwindigkeitsgeregelten Einspritzphase ist ein deutlicher Unterschied von ca. 1 Nm im Kraftniveau des Einspritzantriebs zu erkennen.

Zum Zeitpunkt der volumetrischen Füllung der Kavität gleichen sich die beiden Drehmomentverläufe bedingt durch das Umschalten auf die Druckregelung wieder an.

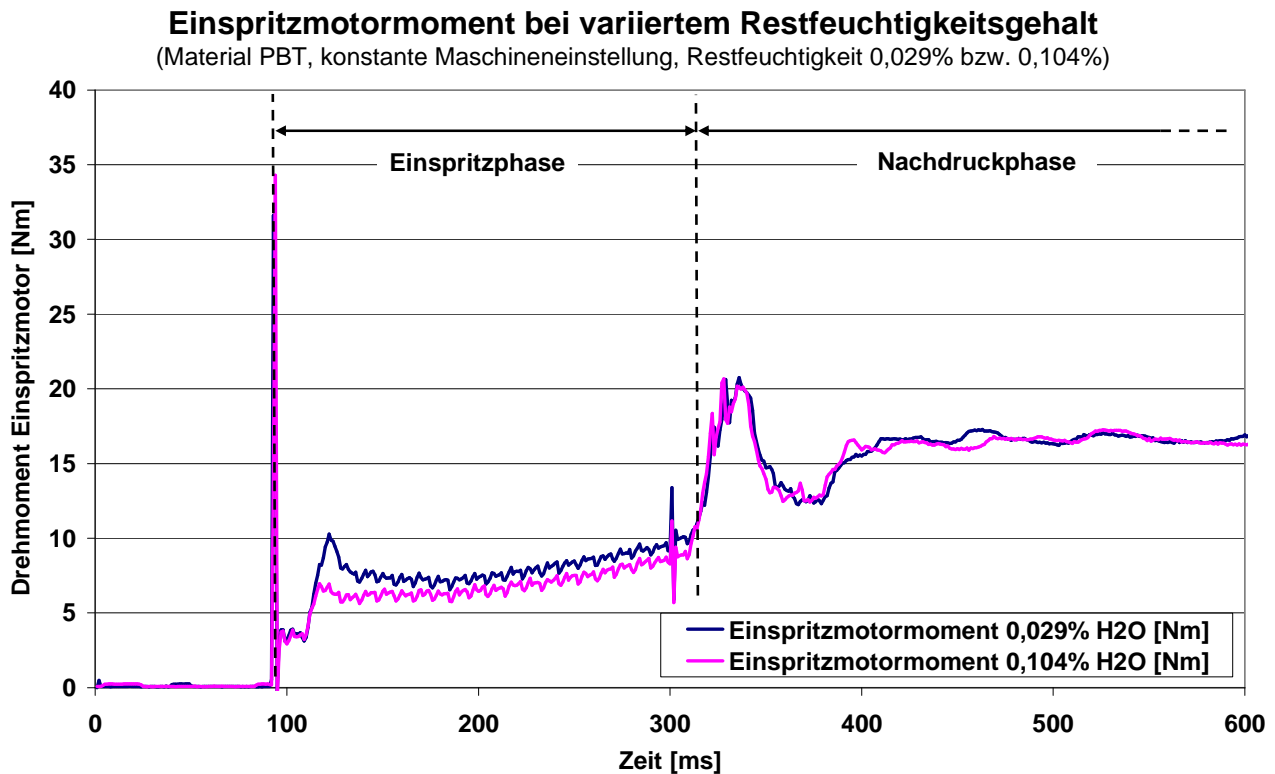


Abbildung 3-24: Einspritzmotormoment bei variiertem Restfeuchtigkeitsgehalt

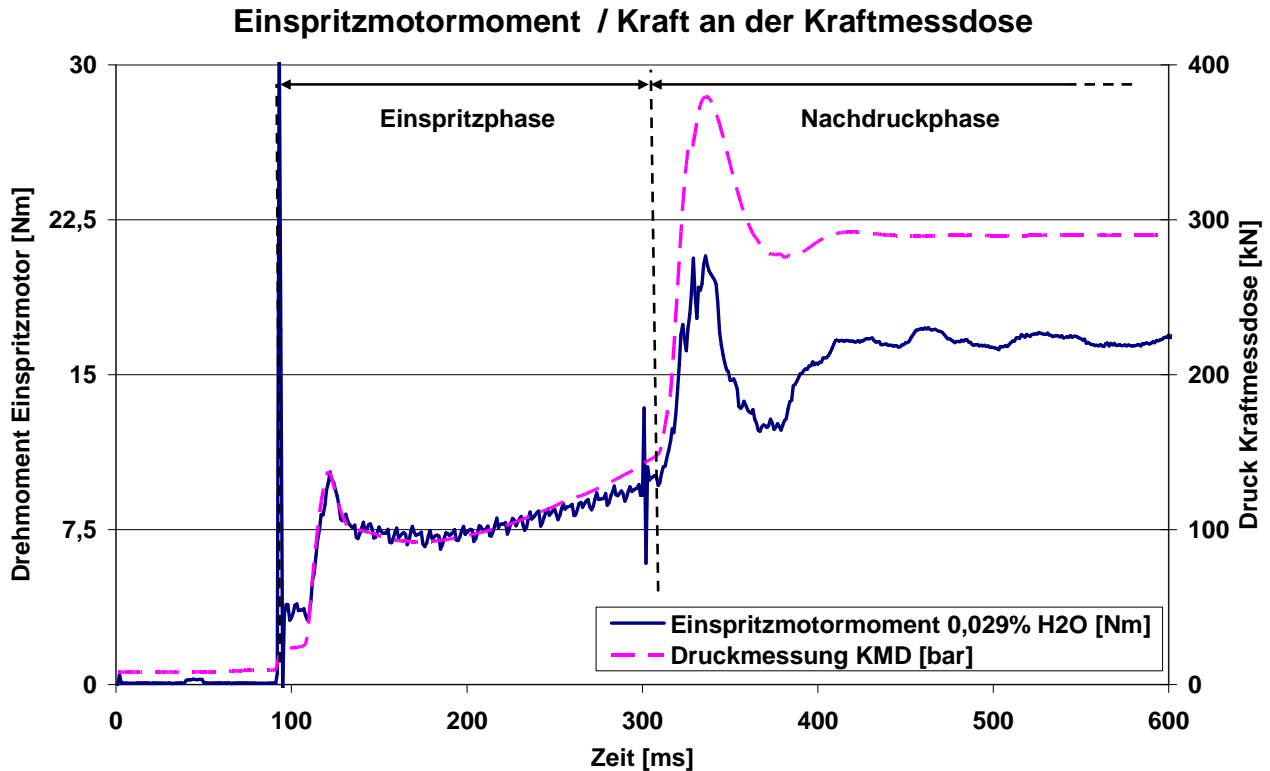


Abbildung 3-25: Einspritzmotormoment und Druck gemessen am Schneckenschaft

Betrachtet man in Abbildung 3-25 die Verläufe von Einspritzdruck und Einspritzmotormoment, so ist der Zusammenhang zwischen beiden Größen deutlich zu erkennen. Bis zum

Erreichen des Umschaltvolumens sind die Verläufe nahezu identisch, in der Kompressionsphase sind dann erste Drehmomentschwankungen zu erkennen, die auf die jetzt aktive Druckregelung zurückzuführen sind. Bis zum Erreichen des konstanten Nachdruckniveaus von hier 290 bar ist der Verlauf weiterhin sehr ähnlich. In der Phase mit konstantem Druck sind dann deutliche Schwankungen des Motormomentes zu erkennen. Aufgrund der sehr ähnlichen Verläufe von Einspritzmotormoment und Einspritzdruck gab es bereits Bestrebungen, den Drucksensor an der Maschine durch eine reine Auswertung des Drehmomentsignals zu ersetzen [PA06]. Ziel ist die Berechnung des aktuellen Einspritz- oder Staudrucks aus dem Betriebszustand des elektrischen Achsantriebs. Dazu werden die Istwerte von Motormoment, Geschwindigkeit und Beschleunigung sowie das mechanisch-dynamischen Verhalten des Antriebsstranges mathematisch abgebildet und eine Druckwert berechnet. Eine kommerzielle Anwendung dieses Verfahrens ist derzeit nicht bekannt.

Die Berechnung eines Drehmomentintegrals der Einspritzachse ist bei konventioneller Spritzgießverfahrensweise mit geschwindigkeitsgeregelter Einspritz- und druckgeregelter Nachdruckphase nur für die Einspritzphase zweckmäßig. Unterschiede eines Drehmomentintegrals über die Nachdruckphase entstehen nur bei Änderungen des Schneckenhubes und damit verbundenen drehwinkelabhängigen Wirkungsgradunterschieden bei der Bildung des Motormomentes aus dem fließenden Strom im elektrischen Motor.

Auf eine weitere vertiefte Darstellung aller verwendeten integralen Prozessparametern soll hier verzichtet werden. Eine zusammenfassende Aufstellung der Parameter findet sich in Tabelle 3-4.

Tabelle 3-4: Zusammenstellung der Integralprozessparameter aus der Druck- und Kraftmessung

Bezeichnung	Einheit	Messstelle	Messzeit
Fließzahl (Düse)	bars	Düsendrucksensor	Einspritzphase
Fließzahl (KMD)	bars	Kraftmessdose	Einspritzphase
Fließzahl (Motor)	Nms	FU-Einspritzachse	Einspritzphase
Druckintegral (Einspritzen)	bars	Düsendrucksensor	Einspritzphase
Druckintegral (Nachdruck)	bars	Düsendrucksensor	Nachdruckphase
Druckintegral (Plastifizieren)	bars	Düsendrucksensor	Plastifizierphase
Druckintegral (Einspritzen)	bars	Kraftmessdose	Einspritzphase
Druckintegral (Nachdruck)	bars	Kraftmessdose	Nachdruckphase
Druckintegral (Plastifizieren)	bars	Kraftmessdose	Plastifizierphase
Drehmomentintegral (Einspritzen)	Nms	FU-Einspritzachse	Einspritzphase
Drehmomentintegral (Nachdruck)	Nms	FU-Einspritzachse	Nachdruckphase
Drehmomentintegral (Plastifizieren)	Nms	FU-Einspritzachse	Plastifizierphase
Werkzeuginnendruckintegral (Einspritzen)	bars	Drucksensor im WZ	Einspritzphase
Werkzeuginnendruckintegral (Nachdruck)	bars	Drucksensor im WZ	Nachdruckphase

3.3 Automatisierte Trendüberwachung mit Prozessdaten

Prozessparameter, die an einer Spritzgießmaschine gemessen und berechnet werden, sollen Änderungen im Prozesszustand der Maschine beschreiben. Je nach Aussagekraft können aus den Prozessparametern dezidierte Informationen über die Art des Störeinflusses gewonnen werden. In einem ersten Schritt ist es notwendig eine Veränderung im Prozess zu erkennen, weshalb im folgenden Kapitel verschiedene Möglichkeiten automationsfähiger Auswertungsansätze vorgestellt werden.

Das Signal/Geräusch-Verhältnis „S/G“ bezeichnet in der Akustik oder der Automatisierungstechnik das Verhältnis von Nutzsignalleistung zu Rauschleistung des Störsignals einer Signalquelle als Maß für die Qualität des Nutzsignals. In [Bo94] wird diese Kenngröße zur Anwendung auf Prozessparameter des Spritzgießprozesses angewendet. Damit wird ein einfaches Maß für die Qualität eines Prozessparameters (Signal) im Vergleich zur Standardabweichung des Prozessparameters (Störsignal) ermittelt.

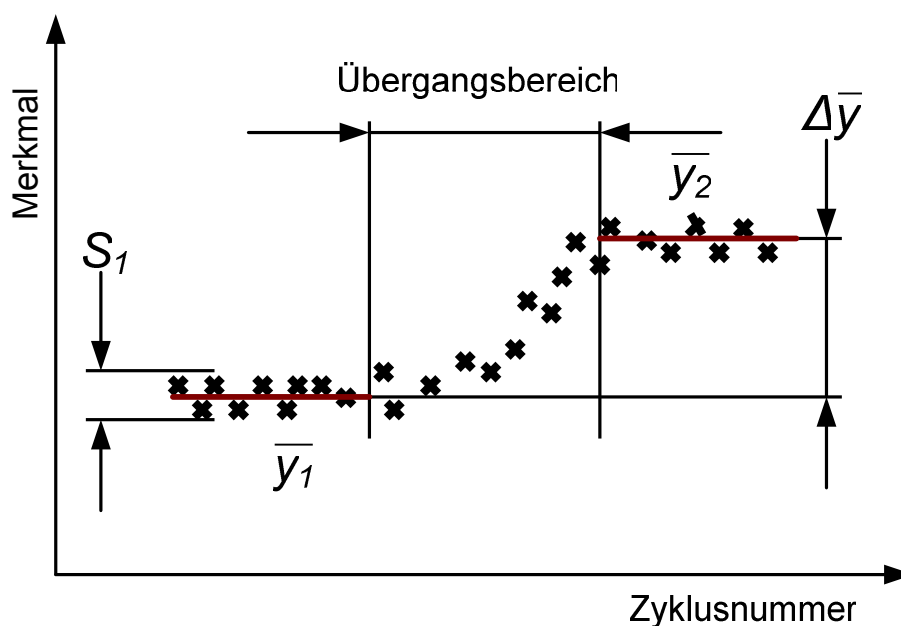


Abbildung 3-26: Schematische Darstellung der Auswertung des Signal - Geräusch Abstandes

In einem ersten Ansatz wird ähnlich zum Signal/Geräusch-Verhältnis die Änderung des Mittelwertes auf die Standardabweichung vor der Störung bezogen (Formel 3-15). Kleine Abweichungen des Mittelwertes und der Standardabweichung werden durch Quadrieren vernachlässigt.

$$S / G = 10 \cdot \log \left(\frac{(\Delta \bar{y})^2}{S_1^2} \right) \text{ in [dB]} \quad \text{Formel 3-15}$$

Durch Darstellen des Wertes in der Einheit dB wird erreicht, dass alle Mittelwertänderungen, die außerhalb der Standardabweichung liegen, ein S/G-Verhältnis größer als Null an-

nehmen. Bei einem negativen S/G-Verhältnis liegt die Amplitude der vorliegenden Störung innerhalb des Rauschens und ist damit nicht signifikant. Der Vorteil des S/G-Verhältnisses liegt darin, dass es für alle Parameter vergleichbar ist. Allgemein gilt, je höher der S/G-Wert, desto klarer kann der Störeinfluss vom Rauschen unterschieden werden. Nachteilig ist jedoch, dass anhand des Wertes nicht definiert ist, in welche Richtung die Parameteränderung stattfindet. Weiterhin ist eine Bewertung der Prozessparameter in der beschriebenen diskreten Form nur nachträglich möglich, weshalb für die online Auswertung ein leicht modifizierter Ansatz gewählt wird.

Dazu wird am Ende eines Zyklus ein S/G-Verhältnis ermittelt, welches auf den Mittelwerten des Prozessparameters der vorausgegangenen Produktionszyklen basiert. Bei jedem neuen Parameterwert, der nach Abschluss eines Spritzgießzyklus vorliegt, entfällt der bis dahin letzte Wert aus der Berechnung. Die Werte des S/G-Verhältnis sind dabei stark von den gewählten Bereichen für die Mittelwertbildung und dem verwendeten Übergangsbereich abhängig (siehe dazu Abbildung 3-26). Wird die Anzahl der Zyklen, über die ein Mittelwert gebildet wird, zu gering gewählt, wird das S/G-Verhältnis bereits bei normalen statistisch verteilten Schwankungen des Parameters stark ansprechen. Werden die Parameter über mehr Zyklen gemittelt, steigt damit die Trägheit der Reaktion und Störungen werden erst später erkannt. Die Größe des Übergangsbereiches, der bei der Berechnung ausgelassen wird, ist entscheidend für den absoluten Wert der berechneten Parameteränderung. Wird der Übergangsbereich zu klein gewählt, werden langsame Parameteränderungen nicht erkannt. Ein langer Übergangsbereich führt wiederum zu hohen Zeitverzögerungen.

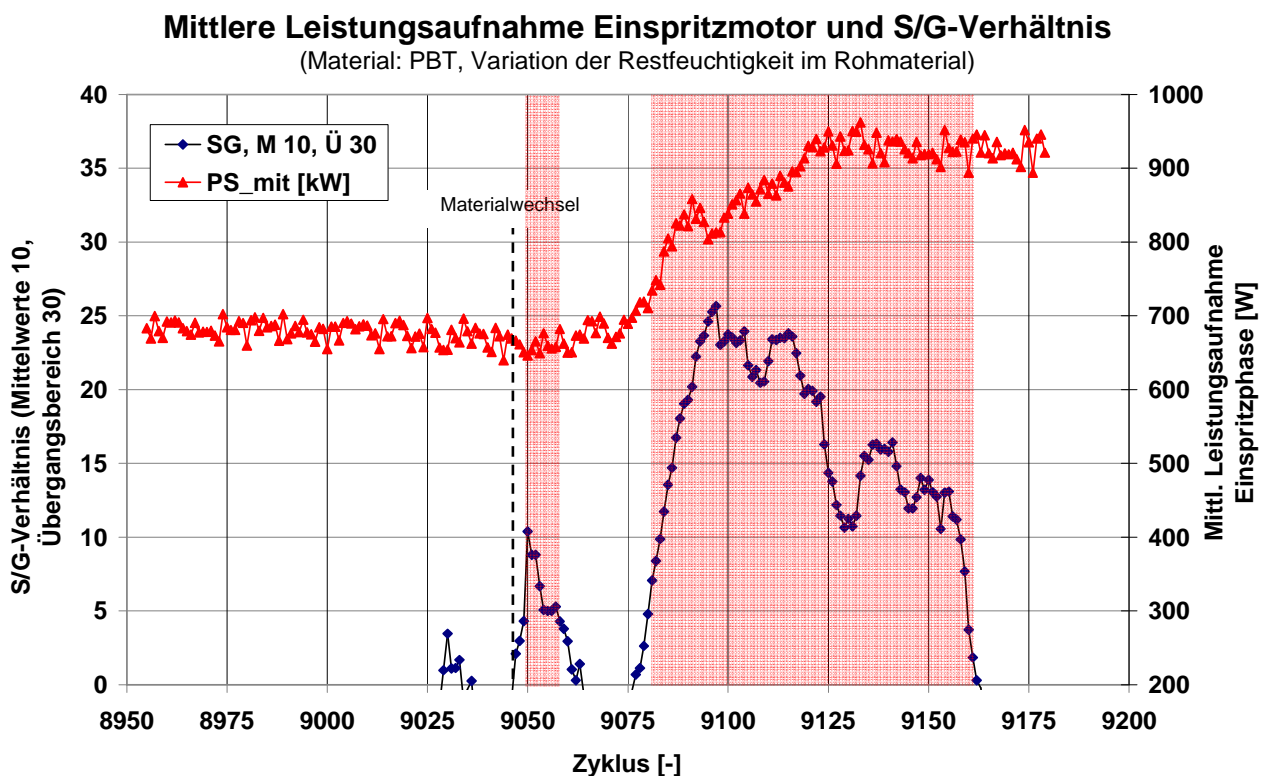


Abbildung 3-27: Mittlere Leistungsaufnahme des Einspritzmotors in der Einspritzphase und das erreichte S/G-Verhältnis über die Versuchsdauer

Angewandt auf den Verlauf der mittleren Einspritzleistung aus Abbildung 3-27 ergibt sich bei einer Mittelwertbildung über 10 Zyklen und Berücksichtigung eines Übergangsbereiches von 30 Zyklen der dargestellte Verlauf des S/G-Verhältnis (siehe dazu Abbildung 3-26). Eine mögliche Visualisierung der Parameterüberwachung kann wie in Abbildung 3-27 beispielhaft dargestellt erfolgen. Der farblich unterlegte Bereich kennzeichnet dabei eine große Änderung des Prozessparameters. Bei dem Überschreiten eines Grenzwertes von hier „S/G-Verhältnis größer 5“ wird eine Warnung an den Maschinenbediener ausgegeben. Zum Zweck der Prozessüberwachung und zum Erkennen von Parameterschwankungen ist das S/G-Verhältnis gut geeignet. Wichtig ist dabei, dass der Übergangsbereich auf das verwendete Werkzeug, die Maschine, das Material sowie den entsprechenden Parameter angepasst ist. Abweichungen in der Reaktionszeit, in der Amplitude der Reaktion und der jeweiligen nicht systematischen Streuung der Prozessparameter sind zu beachten. Weiterhin sind diese Größen vom momentanen Betriebspunkt der Maschine abhängig.

Eine weitere Möglichkeit, Änderungen in Prozessparametern zu erkennen, ist die Überwachung der Steigung eines Parameterverlaufes wie in Abbildung 3-28 dargestellt. Dazu wird die Abweichung eines neu hinzukommenden Wertes von einem vorherigen Wert oder einer Gruppe vorheriger Werte bestimmt. Auch hierbei ist die Berücksichtigung eines Übergangsbereiches integrierbar. Über die Anzahl der gemittelten Werte ist bei dieser Art der Überwachung die Empfindlichkeit der Überwachung einstellbar. Vorteil bei dieser Variante ist, dass auch die Richtung einer Parameteränderung berücksichtigt werden kann. Über die Vorgabe eines Toleranzbereiches einer Parameteränderung kann zusätzlich eine Standardabweichung des Parameters berücksichtigt werden.

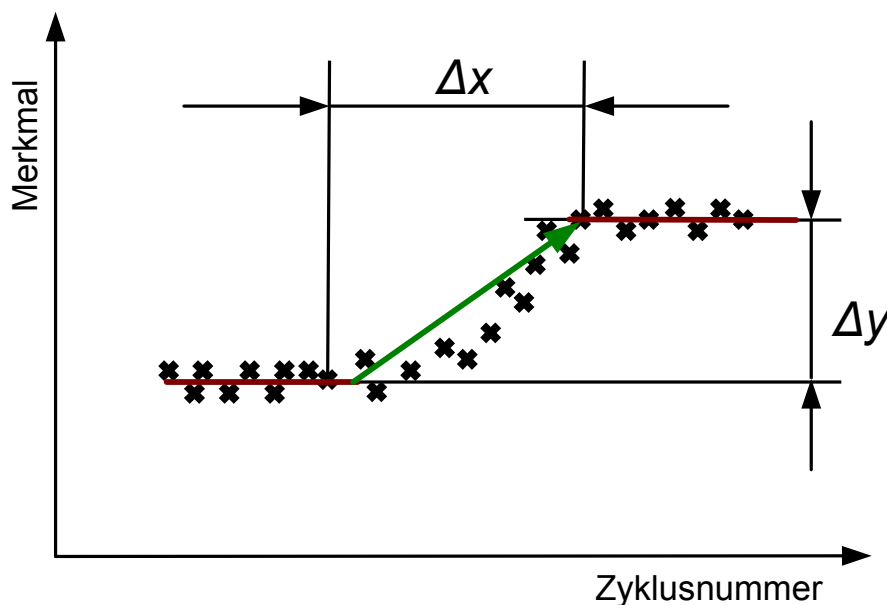


Abbildung 3-28: Schematische Auswertung einer Steigungsänderung eines Prozessparameters

Die Schilderung eines möglichen Ansatzes für die Zukunft soll zusammenfassend einige Anforderungen an die automatische Auswertung und Verarbeitung der gewonnenen In-

formationen liefern. Voraussetzung für alle Abläufe ist ein stetig laufender Prozess an einem robusten Betriebspunkt. Zu Beginn der Prozessüberwachung wird zunächst über eine bestimmte Anzahl von Zyklen ein Ausgangsniveau der einzelnen Parameter bestimmt. In dieser Phase sollte sich keine Störung im Prozess auswirken. Für diesen Anfangszustand des Prozessablaufes wird die Standardabweichung der einzelnen Prozessparameter bestimmt. Diese sind dann Grundlage der Entscheidung, ob eine Änderung signifikant ist oder nicht.

3.4 Aussagekraft der Prozessparameter zur Prozesscharakterisierung

Eine Grundvoraussetzung für den Einsatz von Prozessparametern zur Charakterisierung des Spritzgießprozesses ist ein ausreichender Informationsgehalt der gebildeten Kennzahlen. Eine Prozessregelung kann nur erfolgen, wenn die zu korrigierenden Qualitätsabweichungen am Formteil durch Streuungen der Prozessparameter erkennbar sind. Dabei werden im Rahmen dieser Arbeit nur solche Prozessparameter verwendet, die an einer Standard-Spritzgießmaschine verfügbar sind. Die im Versuchsaufbau zusätzlich eingesetzte Sensorik dient zum einen der Kontrolle des Versuchsablaufes, zum anderen zur Abschätzung der Qualität von identischen Kennzahlen, die auf Basis einer anderen Messstelle des zugrunde liegenden Signals berechnet werden. Ein Beispiel ist die Berechnung der Einspritzarbeit für die drei möglichen Messstellen (Antriebsmotor der Einspritzachse [Nm], Kraftmessung Kraftmesszelle [kN], Druckmessung im Schneckenorraum [kN]) des „Einspritzdruckes“.

Einspritzarbeit berechnet auf Basis verschiedener Messstellen

(Motormoment "Motor", Kraftmessdose "KMD", Düsendrucksensor "Düse")

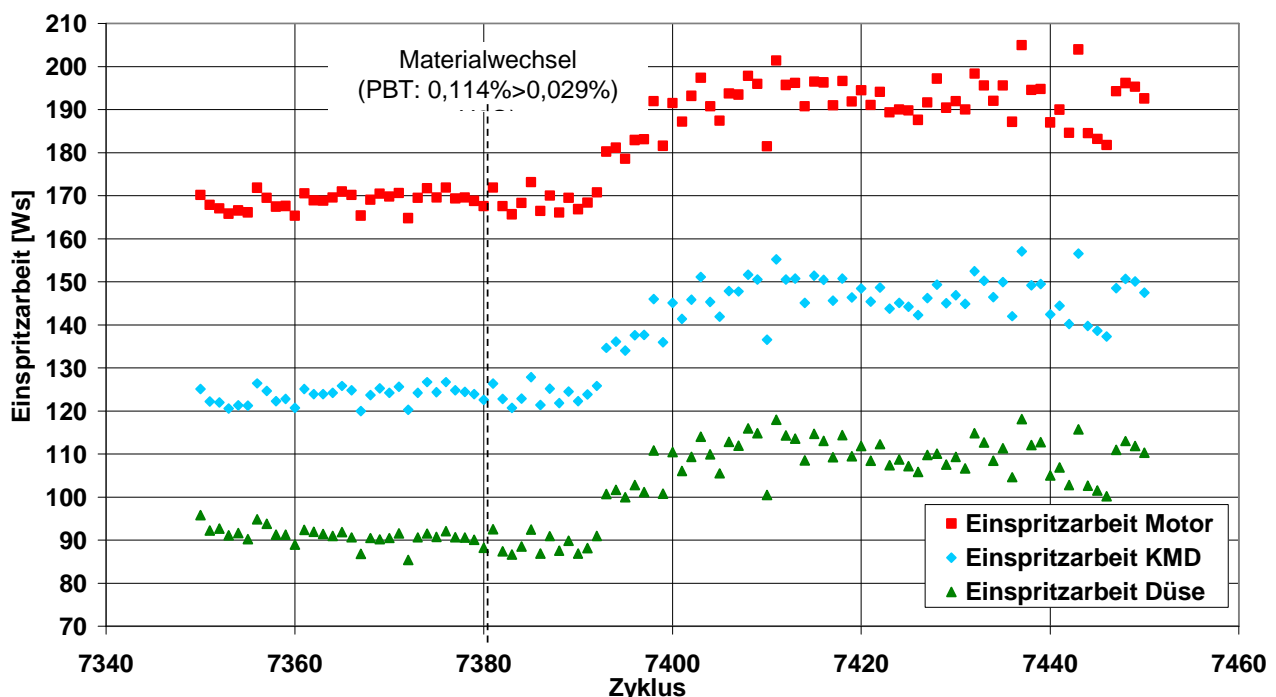


Abbildung 3-29: Fließzahl berechnet auf Basis verschiedener Messstellen (Motor, KMD, Düse)

Die in Abbildung 3-29 dargestellten Verläufe der Einspritzarbeit wurden in einem Versuch mit konstanter Maschineneinstellung und einem Wechsel des Restfeuchtegehaltes im Rohstoff von 0,114 % auf 0,029 % berechnet. Die Verläufe der berechneten Einspritzarbeiten sind ähnlich. Der Niveauunterschied ist auf die Reibungsverluste im System zurückzuführen. Liegt der Wert „Einspritzarbeit Motor“ zu Beginn bei ca. 170 Ws, fällt in der Kraftübertragung zur Kraftmessdose ca. 45 Ws Verlustleistung an, um die der Wert der Einspritzarbeit KMD verringert ist. Zur Druckmessstelle im Schneckenorraum fallen noch weitere 35 Ws an Verlustleistung ab. Dieses Verhältnis der Leistungen kann sich in Abhängigkeit vom verarbeiteten Polymer, dem Betriebszustand sowie dem Verschleißzustand der Einspritzeinheit verändern. Steigen z.B. die Reibungsverluste in der Kugelumlaufspindel, die die Schubschnecke antreibt, werden auch die Verlustleistungen zunehmen. Weiterhin ist der Darstellung zu entnehmen, dass die Streuungen der Einspritzarbeit an allen Messstellen bei dem trockeneren Material höher sind.

Die Bewertung der verschiedenen Prozessparameter erfolgt anhand ihrer Reaktion auf die wirkende Störung. Dazu wird für jeden Parameter eine relative Änderung X_{rel} ermittelt, die wie in Formel 3-16 zu sehen ist, den Niveausprung in das Verhältnis zu dem Absolutwert des Parameters setzt, so dass ein vergleichbarer Prozentwert entsteht.

$$X_{rel} = \frac{(\bar{x}_A - \bar{x}_B) \cdot 100}{\bar{x}_A} \text{ in [\%]} \quad \text{Formel 3-16}$$

Die arithmetischen Mittelwerte des untersuchten Parameters \bar{x} werden jeweils über 30 Zyklen aus dem Bereich vor bzw. nach Wirken der Störung gebildet, wobei der Übergangsbereich vollständig verworfen wird.

In den nachfolgenden Darstellungen werden neben den relativen Änderungen X_{rel} der Parameter auch die Variationskoeffizienten aus dem betrachteten Bereich dargestellt. Auf diese Weise ist schnell ersichtlich, ob ein Parameter eine signifikante Reaktion auf den veränderten Prozess zeigt. Liegt die relative Änderung prozentual unter den Variationskoeffizienten oder übersteigt diesen nur wenig, ist das als nicht signifikant zu bezeichnen und der jeweilige Parameter ist zum Nachweis der jeweiligen Prozessstörung nicht geeignet.

Zur besseren Übersicht werden nachfolgend die betrachteten Prozessparameter jeweils in Gruppen zusammengefasst dargestellt. Die Einteilung geschieht dabei in die Gruppen:

- Arbeitsparameter
- Integralparameter
- Mittelwertparameter

3.4.1 Arbeitsparameter

In Abbildung 3-30 sind die Reaktionen verschiedener Arbeitsparameter auf einen Wechsel in dem Restfeuchtigkeitsgehalt des verarbeiteten PBT dargestellt. Der Feuchtigkeitsanteil

wurde dabei von 0,119 % auf 0,067 % gesenkt. Betrachtet man rein die Variationskoeffizienten, werden bei dem Material mit höherer Feuchte bei allen Parametern geringere oder mindestens gleich große Streuungen erreicht.

Betrachtet man die Gesamtheit der Arbeitsparameter, sind diese in zwei Hauptkriterien zu unterteilen. Zum einen basieren die Parameter auf Messwerten unterschiedlicher Messstellen, zum anderen werden die Arbeiten für jeweils andere Prozessphasen berechnet. Die Einspritzarbeit „EA_*“ z.B. wird jeweils basierend auf dem Motormoment, dem Düsen- druck und dem Kraftsignal der Kraftmessdose berechnet. Die relative Änderung nach der Feuchtigkeitsvariation steigt dabei vom Motor mit 9,1 % über die Kraftmessdose mit 13,2 % bis zur Düse mit 14,4 % hin an. Im Gegensatz zur Einspritzarbeit, die in der Einspritz- und Nachdruckphase berechnet wird, basiert die Füllarbeit „FA_*“ rein auf der Formfüllphase bis zum Erreichen des Umschaltpunktes. Die Füllarbeit zeigt dabei leicht höhere relative Reaktionen von bis zu 16,3 %.

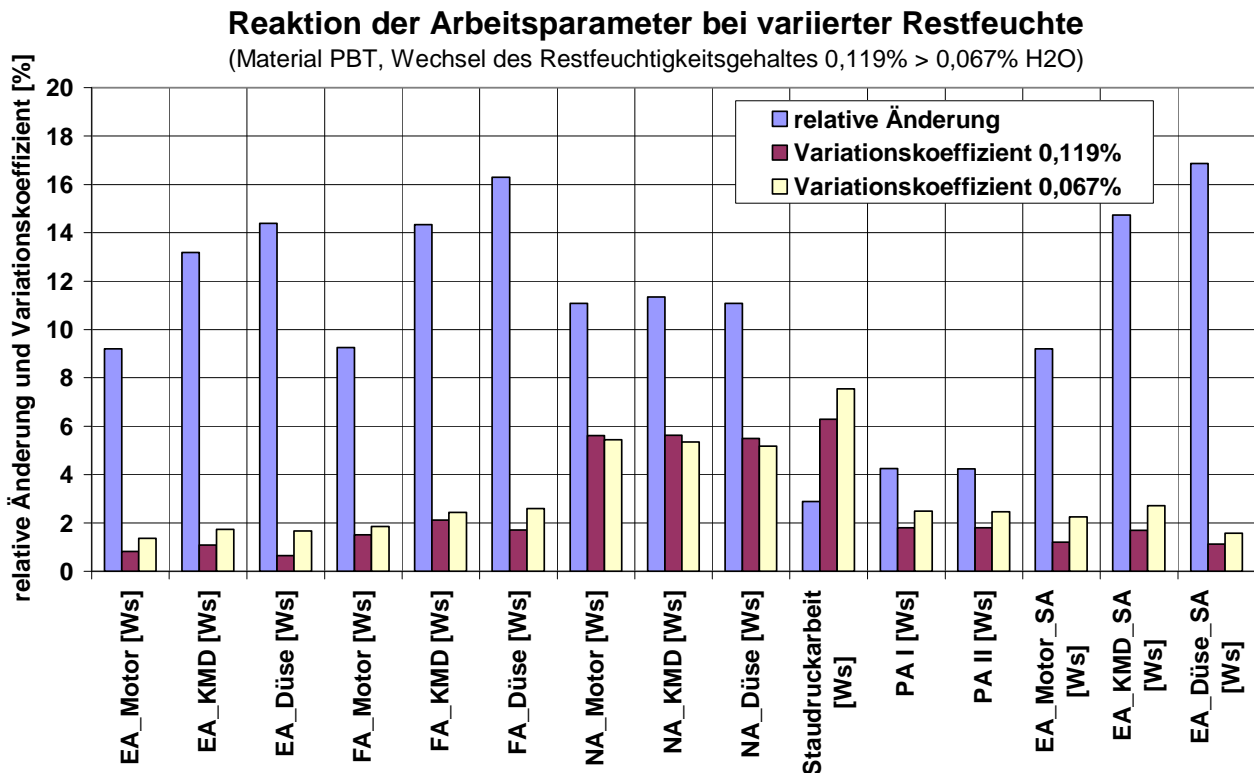


Abbildung 3-30: Reaktion der Arbeitsparameter bei variiertem Restfeuchtigkeitsgehalt des Rohmaterials (PBT)

In Anlehnung an die Berechnungsmethode einer Fließzahl, bei der ein Druckintegral über den mittleren Ausschnitt des Schneckenweges gebildet wird, wurde die Berechnung der Einspritzarbeit ebenfalls auf einen Teilbereich des Schneckenhubes beschränkt (in der Darstellung rechts „*_SA“). Durch diese Änderung konnte jedoch keine signifikante Verringerung des Variationskoeffizienten erreicht werden. Die relativen Änderungen dieser Parameter liegen leicht über dem Niveau der Werte der Füllarbeit.

Die relative Änderung der Plastifizierarbeiten „PA“ liegen mit 4,2 % um ca. 2 % über der Streuung derselbigen und sind im Vergleich zu anderen Parametern wenig signifikant.

Die Reaktion der Nachdruckarbeiten „NA_“ liegt unabhängig von der jeweiligen Messstelle auf einem Niveau von ca. 11 %. Obwohl die Variationskoeffizienten der Nachdruckarbeiten mit ca. 5,5 % im Vergleich zu anderen Arbeitsparametern verhältnismäßig groß sind, können die Parameter dennoch als signifikant bezeichnet werden. Zu den Nachdruckarbeiten ist anzumerken, dass der im Zyklus zurückgelegte Schneckenhub in der Nachdruckphase den Zahlenwert mit beeinflusst. Die Änderungen in den Nachdruckarbeiten zeigen eine hohe Korrelation mit Schwankungen des Restmassepolsters.

In Abbildung 3-31 sind die Arbeitsparameter aus einem weiteren Versuch, bei dem ein PA6 verarbeitet wird, dargestellt. Der Wasseranteil im Rohstoff wurde in diesem Versuch von 0,090 % auf 0,049 % gesenkt. Dieser Materialtyp zeigt insgesamt eine wesentlich geringere Reaktion auf einen Wechsel der Restfeuchtigkeit des Rohstoffes.

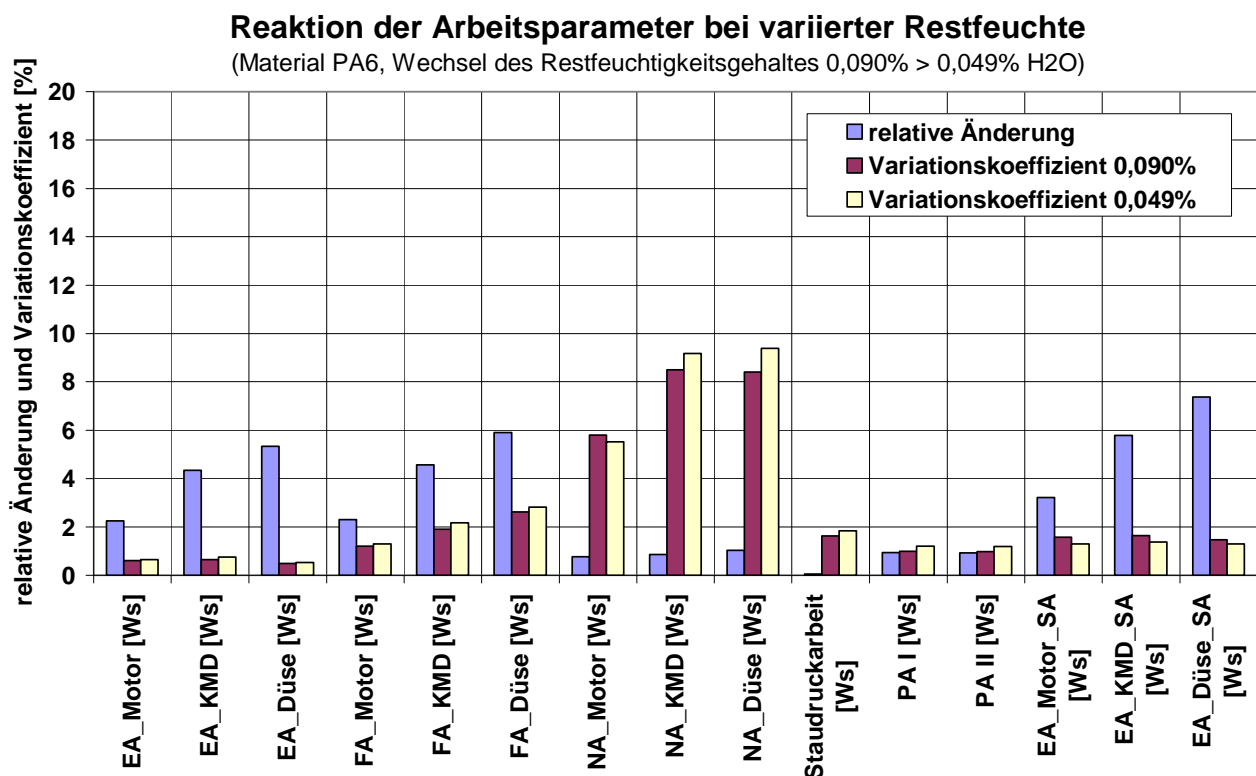


Abbildung 3-31: Reaktion der Arbeitsparameter bei variiertem Restfeuchtigkeitsgehalt des Rohmaterials (PA Typ B)

Die Variationskoeffizienten vor und nach dem Materialwechsel zeigen keine deutlichen Unterschiede, was auf einen geringen Einfluss der eingebrachten Störung schließen lässt. Weiterhin sind die erreichten relativen Änderungen der Arbeitsparameter deutlich geringer als die der Versuchsreihe mit PBT. Die größte Reaktion wird mit 7,3 % in der Einspritzar-

beit „EA_Düse_SA“, die über einen Ausschnitt des Schneckenhubes berechnet wird, erreicht.

Daneben sind nur noch die Reaktionen der Einspritzarbeiten als signifikant zu bezeichnen. Die Füllarbeiten zeigen zwar ähnlich hohe Reaktionen auf die Störung im Rohstoff, diese werden jedoch durch die gleichzeitig hohen Variationskoeffizienten relativiert.

Bei allen Arbeitsparametern ist ein deutlicher Trend zu erkennen, so nehmen die Werte der relativen Änderung von der Messstelle Düsendrucksensor über die Kraftmessdose bis zum Motormoment erkennbar ab. Entlang der Wirkungskette der Prozessstörung wird der messbare Effekt schwächer, wobei die relativen Änderungen in allen Messstellen deutlich über den Variationskoeffizienten liegen und damit als signifikant zu bezeichnen sind.

Die relative Änderung der Plastifizierarbeit „PA_“ liegt in diesem Fall innerhalb der Streuung derselbigen und ist damit als nicht signifikant anzusehen.

Auch die berechneten Nachdruckarbeiten „NA_“ zeigen keine Reaktion auf die eingebrachte Störung. Die relativen Abweichungen erreichen Werte um 1 %, gleichzeitig liegen die Variationskoeffizienten zwischen 5 % und 10 %.

Ebenfalls zu den Arbeitsparametern zu zählen sind die über die Zylinderheizungen eingebrachten Heizenergien. Die Auswertung der durch die Heizelemente in das System eingebrachten Energieanteile bei einer simulierten Viskositätsstörung zeigten keine signifikanten Reaktionen auf die Prozessstörungen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Effekt der Viskositätsänderung im Vergleich zur eingebrachten Heizenergie sehr gering ist. Die Auswertung einer Versuchsreihe, in der ein PBT mit Restfeuchtigkeitsgehalten von 0,119 % und 0,067 % verarbeitet wurde, verdeutlicht diesen Sachverhalt. Durch den Wechsel auf den trockeneren Rohstoff steigt die Plastifizierarbeit und damit die in die Schmelze eingebrachte Energie um ca. 800 Ws auf 6300 Ws an. Im Verlauf eines Zyklus der gleichen Versuchsreihe gibt die Heizzone mit dem geringsten Energieanteil bereits 1800 Ws an das System ab, der Energiebeitrag aller Heizelemente in Summe liegt im Mittel bei 42 kW. Die vergleichsweise hohen Heizenergien zeigen beim untersuchten Prozess mit langen Stillstandszeiten nach dem Plastifizieren keine signifikanten Reaktionen auf die eingebrachte Viskositätsstörung.

3.4.2 Integralparameter

Betrachtet man die untersuchten integralen Prozessparameter in Abbildung 3-32 und Abbildung 3-33 so entsprechen die Ergebnisse weitgehend den bereits bei den Arbeitsparametern gemachten Erkenntnissen. Die höchsten relativen Änderungen werden in den Parametern erreicht, die auf der Einspritzphase basieren. Beispielhaft sind hier die Druck- bzw. Drehmomentintegrale in der Einspritzphase „Int_*_E“ zu nennen, diese zeigen als einzige der aufgeführten Parameter eine signifikante Reaktion auf die über den Rohstoff eingebrachte Störung.

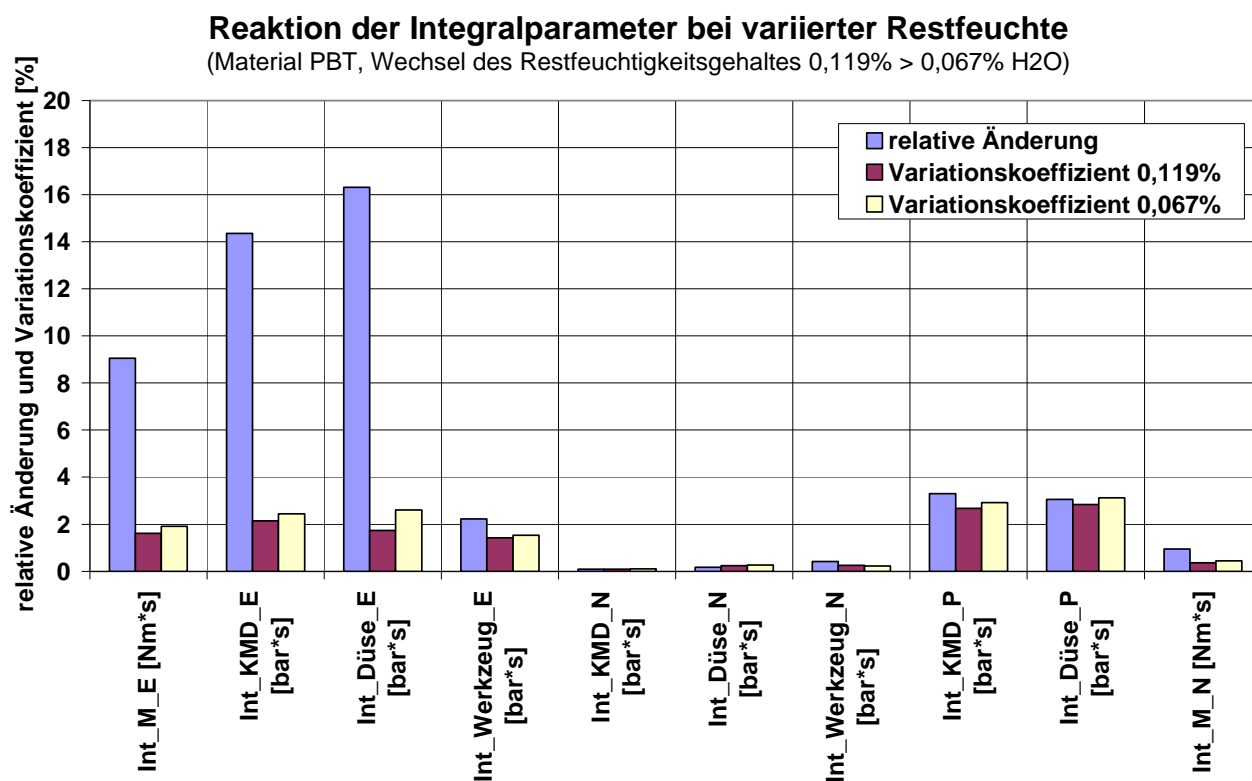


Abbildung 3-32: Reaktion der Integralparameter bei variiertem Restfeuchtigkeitsgehalt des Rohmaterials (PBT)

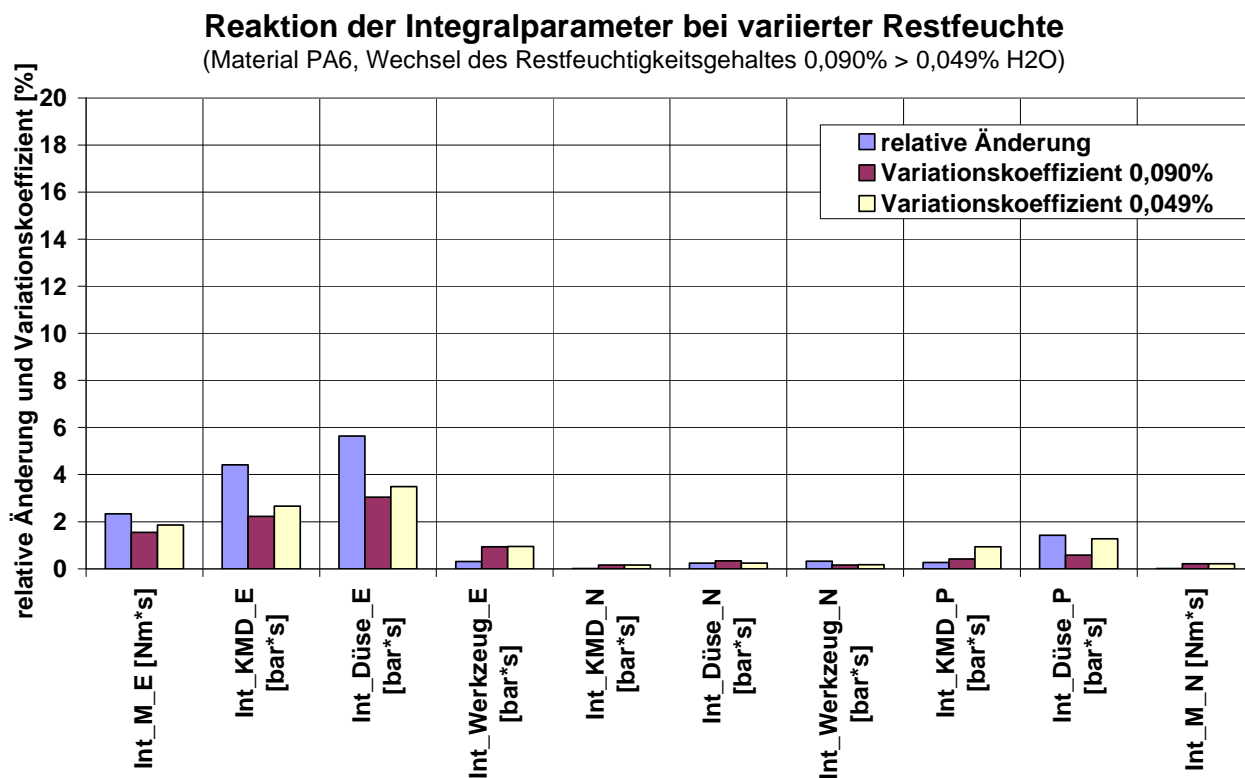


Abbildung 3-33: Reaktion der Integralparameter bei variiertem Restfeuchtigkeitsgehalt des Rohmaterials (PA Typ B)

Dabei steigen die relativen Änderungen entlang der Wirkungskette vom Motor mit 9,0 % über die Kraftmessdose mit 14,3 % zum Drucksensor im Schneckenorraum mit 16,3 % an. Die Änderung des Werkzeuginnendruckintegrals liegt über der erreichten Varianz und ist jedoch weniger signifikant.

Die integralen Parameter aus der Nachdruck- und Plastifizierphase reagieren nur gering oder gar nicht auf die Änderung im Prozess. Wie im Abschnitt zuvor sind auch bei den Integralparametern die relativen Änderungen in dem Versuch mit PA6 insgesamt wesentlich geringer, zeigen zugleich aber gleiche Tendenzen.

3.4.3 Mittelwertparameter

Neben den Arbeits- und Integralparametern werden hier noch einige Mittelwerte von Prozessparametern in verschiedenen Prozessphasen betrachtet. Zwischen den Druckwerten und den Drehmomentwerten besteht ein direkter Zusammenhang. Ein steigender Druckbedarf in der Formfüllphase durch eine gesteigerte Schmelzeviskosität führt zu steigenden Drehmomenten am Einspritzantrieb.

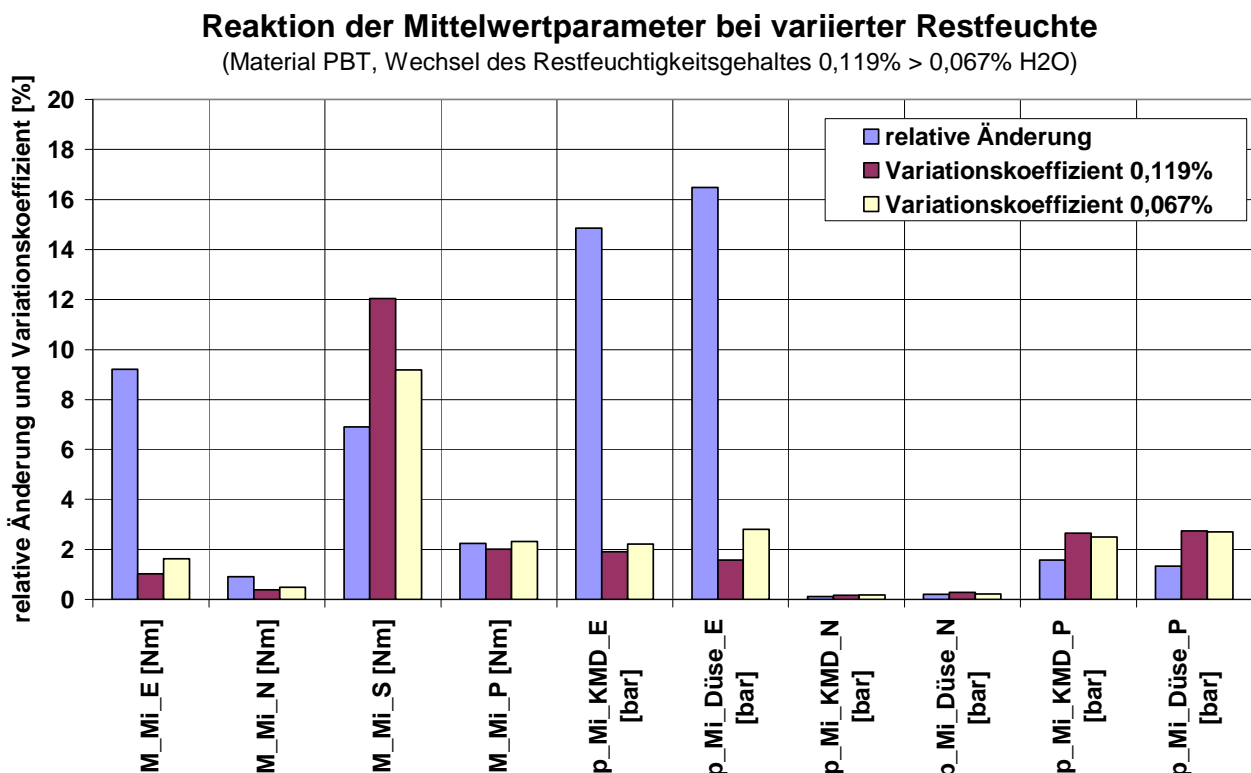


Abbildung 3-34: Reaktion der Mittelwertparameter bei variiertem Restfeuchtigkeitsgehalt des Rohmaterials (PBT)

Wie schon bei den zuvor dargestellten Parametern sind bei den Mittelwerten die Parameter der Einspritzphase besonders aussagekräftig und zeigen die höchsten relativen Ände-

rungen. Dabei sind insbesondere die Druckmittelwerte der Kraftmessdose mit 14,8 % sowie des Düsendrucksensors mit 16,4 % zu nennen.

Die Druck- bzw. Drehmomentwerte stellen in der Nachdruckphase „*_N“ die Regelgröße dar, weshalb sich bei den daraus ermittelten Mittelwertparametern sehr geringe Variationskoeffizienten ergeben. Wie bei den zuvor betrachteten Parametern ist auch hier die Reaktion der Parameter bei dem Versuch mit PA6 deutlich geringer als im Versuch mit PBT.

Reaktion der Mittelwertparameter bei variiertem Restfeuchte

(Material PA6, Wechsel des Restfeuchtigkeitsgehaltes 0,090% > 0,049% H₂O)

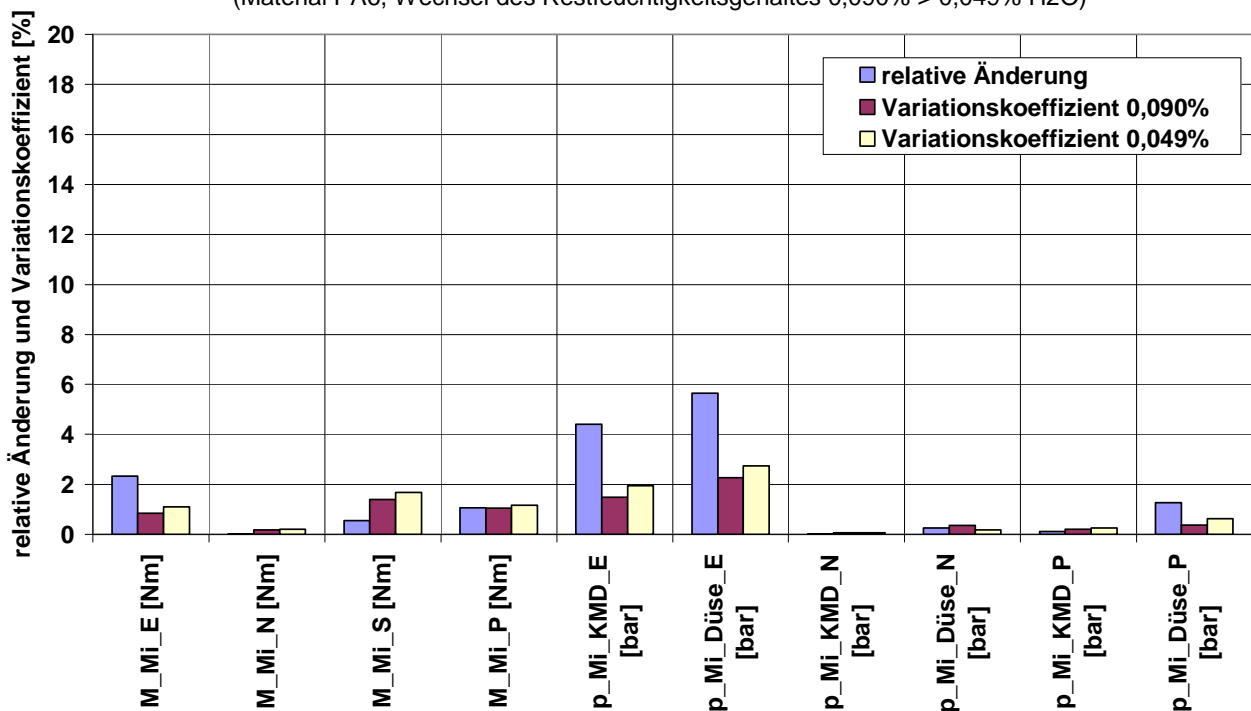


Abbildung 3-35: Reaktion der Mittelwertparameter bei variiertem Restfeuchtigkeitsgehalt des Rohmaterials (PA Typ B)

Zusammenfassende Bewertung

Zum Vergleich der spezifischen Reaktion der Prozessparameter bietet sich die Berechnung eines Signal/Geräusch-Verhältnisses an. Wie in Kapitel 3.3 bereits vorgestellt, beschreibt diese Kennzahl das Verhältnis von Nutzsignal zum Rauschen des Signals. Ist die durch eine Störung hervorgerufene Änderung eines den Prozess beschreibenden Parameters gleich (geringer) als seine Streuung, ergibt sich das S/G-Verhältnis zu Null (negativen Werten). Bei signifikanten Parameteränderungen, die die natürliche Streuung des Parameters übersteigen, wird das S/G-Verhältnis positiv.

In Tabelle 3-5 ist die Auswertung von insgesamt sechs Versuchsreihen dargestellt. Für die dargestellten Parameter wurde jeweils der Wert des S/G-Verhältnisses berechnet.

Tabelle 3-5: S/G-Verhältnis der Reaktion der Prozessparameter auf eine Feuchtigkeitsschwankung (signifikante Parameter der Versuchsreihe farbig unterlegt)

Materialtyp	S/G-Verhältnis					
	Polyamid Typ A		Polyamid Typ B		Polybutylenterephthalat	
	V1	V2	V1	V2	V1	V2
Materialfeuchtigkeit	0,063%>0,105%	0,023%>0,049%	0,171%>0,056%	0,090%>0,049%	0,017%>0,104%	0,119%>0,067%
M_Mi_E [Nm]	-26,70	-12,13	10,60	8,83	15,76	14,25
M_Mi_N [Nm]	2,50	-29,91	1,88	-26,89	4,06	5,53
M_Mi_S [Nm]	-5,86	-9,51	1,33	-7,96	3,98	-5,70
M_Mi_P [Nm]	-4,16	-14,10	-10,33	0,22	3,93	2,90
EA_Motor [Ws]	6,50	-9,39	12,61	11,33	17,40	15,77
EA_Düse [Ws]	11,83	-0,28	20,68	20,91	18,22	17,21
EA_KMD [Ws]	11,94	-7,21	17,70	16,44	17,68	16,74
FA_Motor [Ws]	-32,59	-10,51	10,09	5,68	14,03	13,34
FA_Düse [Ws]	-10,53	-12,13	10,74	7,05	16,58	14,40
FA_KMD [Ws]	-9,30	-11,70	10,90	7,60	15,28	14,41
NA_Motor [Ws]	-3,57	-24,12	-3,72	-17,53	3,62	4,61
NA_Düse [Ws]	-3,45	-23,62	-7,06	-18,15	4,25	5,11
NA_KMD [Ws]	-3,31	-22,44	-7,39	-19,98	2,97	5,14
Staudruckarbeit [Ws]	-5,93	-7,39	-10,13	-29,67	-5,58	-12,67
PA I [Ws]	-13,07	-14,73	1,80	-0,40	10,91	5,49
PA II [Ws]	-14,09	-13,67	1,68	-0,41	10,94	5,48
p_Mi_KMD_E [bar]	-8,07	-12,28	11,81	9,47	16,34	14,29
p_Mi_Düse_E [bar]	-9,11	-12,34	11,03	7,92	17,12	13,74
Int_KMD_E [bar*s]	-9,69	-11,78	8,97	5,97	15,25	14,38
Int_Düse_E [bar*s]	-11,03	-12,05	8,87	5,37	16,61	14,34
Int_Werkzeug_E [bar*s]	-16,06	-26,88	-4,19	-9,68	0,99	4,06
p_Mi_KMD_N [bar]	-18,13	-33,84	-34,08	-13,24	-11,79	-2,53
p_Mi_Düse_N [bar]	-9,14	-27,08	-18,13	-3,23	2,66	0,30
Int_KMD_N [bar*s]	-20,18	-13,06	-16,23	-33,18	2,58	0,17
Int_Düse_N [bar*s]	-13,06	-19,31	-48,74	-2,87	4,01	-2,27
Int_Werkzeug_N [bar*s]	9,79	1,73	8,18	5,77	10,07	6,84
p_Mi_KMD_P [bar]	-8,73	-11,26	8,53	-4,79	-10,33	-2,61
p_Mi_Düse_P [bar]	-10,51	-11,11	0,61	10,84	-4,22	-5,49
Int_KMD_P [bar*s]	-4,53	-10,53	1,70	-3,83	4,71	2,36
Int_Düse_P [bar*s]	-5,45	-17,34	0,83	7,77	3,53	0,66
Fließzahl Motor	-5,77	-14,63	8,62	6,20	15,15	11,52
Fließzahl KMD	-0,56	-18,11	12,90	10,99	15,06	13,69
Fließzahl Düse	0,99	-16,54	15,71	13,97	16,22	18,78
Int_M_E [Nm*s]	-57,29	-11,48	5,94	3,58	12,16	12,76
Int_M_N [Nm*s]	2,46	-21,32	1,48	-36,35	4,30	6,35

Da sich gegebenenfalls die Streubreiten der Parameter vor und nach Wirken der Störung ändern, wurde als Berechnungsgrundlage jeweils der Startzustand gewählt. In den Versuchsreihen werden drei verschiedene Rohstoffe verarbeitet. Dabei handelt es sich um zwei PA-Typen und einen PBT-Typ, bei denen jeweils zwei verschiedenen hohe Wechsel im Restfeuchtigkeitsgehalt untersucht werden. Zur besseren Übersicht sind die Prozessparameter, die im Versuch eine signifikante Reaktion zeigen, farbig unterlegt.

Es wird deutlich, dass im Versuch mit PBT die größten Reaktionen der Prozessparameter zu verzeichnen sind. Bis auf wenige Ausnahmen zeigen hier alle Parameter eine erhebliche Reaktion. Vergleicht man die Versuchsreihen, so ist zu erkennen, dass bei der grös-

ren Änderung der Restfeuchtigkeit in V1 auch die größeren S/G-Verhältnisse erreicht werden.

Bei den beiden Polyamidtypen ist die Auswirkung der Restfeuchtigkeitsschwankung deutlich geringer. Während bei PA-Typ B noch relativ viele Parameter eine signifikante Reaktion zeigen, ist bei dem PA-Typ A kaum eine Reaktion festzustellen. Wie bereits in den vorausgegangenen Abschnitten deutlich wurde, zeigen die auf der Einspritzphase basierenden Parameter die stärksten Reaktionen auf die Prozessstörung.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Parameter, die auf der geschwindigkeitsregelten Einspritzphase basieren, die höchsten Reaktionen zeigen. In dieser Phase mit konstantem Geschwindigkeitsprofil können die durch die wechselnden Restfeuchtigkeitsanteile verursachten Viskositätsänderungen in Form von abweichendem Druck- bzw. Kraftbedarf nachgewiesen werden.

Arbeitsparameter, bei deren Berechnung die Schneckenbewegung mitberücksichtigt wird, können auch in der druckgeregelten Nachdruckphase Änderungen im Prozess gut nachweisen, die z.B. über integrale Parameter nicht detektierbar sind.

Bei der Betrachtung der Prozessparameter ist immer auch die zugrundeliegende Prozessregelung der Spritzgießmaschine in die Betrachtung mit einzubeziehen. Deutlich wird dies insbesondere bei den Prozessparametern der Einspritz- und Nachdruckphase, deren Informationsgehalt sich aufgrund der unterschiedlichen geregelten Größen klar unterscheidet.

3.5 Prozessregelung mit Arbeits-Energieparametern

In der Spritzgießproduktion kommt es immer wieder zu rohstoffinduzierten Störungen, die die Prozesse in der Spritzgießmaschine derart beeinflussen, dass sich die produzierte Bauteilqualität ändert. Da diese Prozessstörungen in der Spritzgießproduktion nicht vollständig abzustellen sind, ist eine automatische Kompensation von wirkenden Störungen durch die Spritzgießmaschine sehr wünschenswert.

Über ein Qualitätsmodell kann aus Prozessgrößen das zu erwartende Qualitätsmerkmal prognostiziert werden, dieser errechnete Bauteilzustand wird dann als Rückführung in einem Qualitätsregelkreis verwendet. Das Qualitätsmodell bildet die Zusammenhänge zwischen den jeweiligen Prozessbedingungen und der Formteilqualität ab. Die Qualität des verarbeiteten Rohmaterials beeinflusst dabei den Prozesszustand, der über die Prozessparameter beschreibbar wird.

Grundsätzlich unterscheidet man zwei verschiedene Methoden der Modellbildung, den physikalischen und den empirisch/statistischen Ansatz. Wird der Prozess in ersterem über physikalische Gesetzmäßigkeiten beschrieben, basiert die Modellierung bei letzterem auf mathematisch-statistisch gefundenen Zusammenhängen zwischen den Prozessdaten und der Formteilqualität.

Eine elementare Grundlage aller Modellierungsansätze ist die Notwendigkeit von Eingangsdaten mit ausreichender Qualität. Die Genauigkeit der Prognose eines Qualitätsmo-

dells ist direkt abhängig vom Informationsgehalt der den Prozess beschreibenden Parameter. Um die im Rahmen dieser Arbeit dargestellten Energie- und Arbeitsparameter auf ihre Eignung zur Modellbildung hin zu untersuchen, wurden verschiedene Versuchsreihen durchgeführt. Dabei wird untersucht inwiefern die Prozessparameter sich für eine Prognose einer Bauteilqualität eignen.

Als repräsentatives Qualitätsmerkmal wird das Formteilgewicht herangezogen, welches in vielen technischen Anwendungen hohe Korrelationen mit den geometrischen Abmaßen der Formteile erreicht. Weiterhin lässt sich das Formteilgewicht schnell mit hoher Genauigkeit erfassen.

Zur Modellbildung wird die in Kapitel 3.1.3.2 beschriebene Software WinQS verwendet. Es werden nur solche Prozessparameter zur Modellbildung zugelassen, die auch an einer Standard-Spritzgießmaschine verfügbar sind. Die Auswahl der signifikanten Parameter und die Modellbildung werden automatisiert durch die Software vorgenommen.

Bei einer prognostizierten Qualitätsabweichung erfolgt nach Überschreiten von festgelegten Grenzen der Eingriff in den Prozess über eine manuelle Nachführung der Nachdruckhöhe. Die Nachdruckhöhe als Stellgröße bietet eine Möglichkeit die Formteilkonstruktion ohne zeitlichen Versatz zu beeinflussen. Der Betrag der Korrektur wird auf der Basis eines in einem Vorversuch ermittelten Zusammenhangs bestimmt.

Der zugrundeliegende Versuchsablauf ist in Abbildung 3-36 dargestellt. Begonnen wird mit einem Versuchsteil, in dem die für die Modellbildung notwendige Datenbasis erzeugt wird. Damit ein statistisch basiertes Prozessmodell anhand der Prozessparameter eine wirkende Störung erkennen kann, muss der Effekt in der Datenbasis vorhanden sein. Aus diesem Grund wird bei konstant laufendem Prozess ein Granulat abweichender Restfeuchtigkeit (als simulierte Störgröße) in den Trichter der Maschine eingefüllt. Die Maschineneinstellung wird dabei nicht angepasst.

Um im Prozessmodell die Wirkweise einer Stellgröße zur Korrektur der Störung abzubilden muss die gewählte Stellgröße ebenfalls variiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Nachdruckhöhe aufgrund ihrer direkten Wirkung auf die Formteilqualität als Stellgröße verwendet.

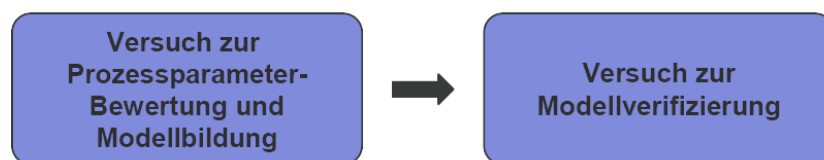


Abbildung 3-36: Versuchsablauf zur Prozessregelung

Daran schließt sich ein zweiter Versuchsteil an, in dem das im vorausgegangenen Versuchsteil gebildete Prozessmodell überprüft wird. Dazu wird wiederum bei konstantem Betrieb der Maschine gezielt eine Restfeuchtigkeitsstörung eingebracht. Das Prozessmodell soll dann die spezifischen Auswirkungen der Feuchtigkeitsänderung auf die Bauteilqualität prognostizieren. Basierend auf dem Prognosewert wird eine Korrektur der Maschineneinstellung vorgenommen. Dabei werden verschiedene Eingriffsgrenzen definiert, nach deren

Überschreiten der Eingriff in den Prozess über eine manuelle Nachführung der Nachdruckhöhe erfolgt.

3.5.1 Versuchsreihe mit Polybutylenterephthalat I

Generierung der Datenbasis zur Erstellung des Prozessmodells

Rohstoffinduzierte Störungen bewirken veränderte Viskositäten der Schmelze. Um den Zusammenhang zur Formteilqualität im Prozessmodell abzubilden, wird im ersten Versuchsteil gezielt eine Störung in Form eines veränderten Restfeuchtegehaltes des Rohstoffes in den Prozess eingebracht. Dabei werden die Prozess- und Qualitätsparameter aufgezeichnet. Die Datensätze umfassen die Streuungen der Zustandsgrößen bzw. Prozessparameter und Qualitätsgrößen um den aktuell eingestellten Betriebspunkt sowie die Reaktion des Prozesses/Qualitätsmerkmals auf die Feuchtigkeitsvariation.

Soll im nächsten Schritt bei prognostizierten Qualitätsabweichungen korrigierend in den Prozess eingegriffen werden, muss die Wirkungsweise und -größe der Stellgröße ebenfalls in den Datensätzen enthalten sein. Im Rahmen dieser Arbeit wird als Stellgröße die Nachdruckhöhe verwendet, da sie einen direkten Einfluss auf die Formteilqualität hat und eine Änderung ausschließlich die Prozessparameter der Nachdruckphase beeinflusst.

Nachdruckintegral (KMD) und Einspritzarbeit (KMD)

(Material: PBT, Maschineneinstellung konst. bis auf Nachdruckhöhe)

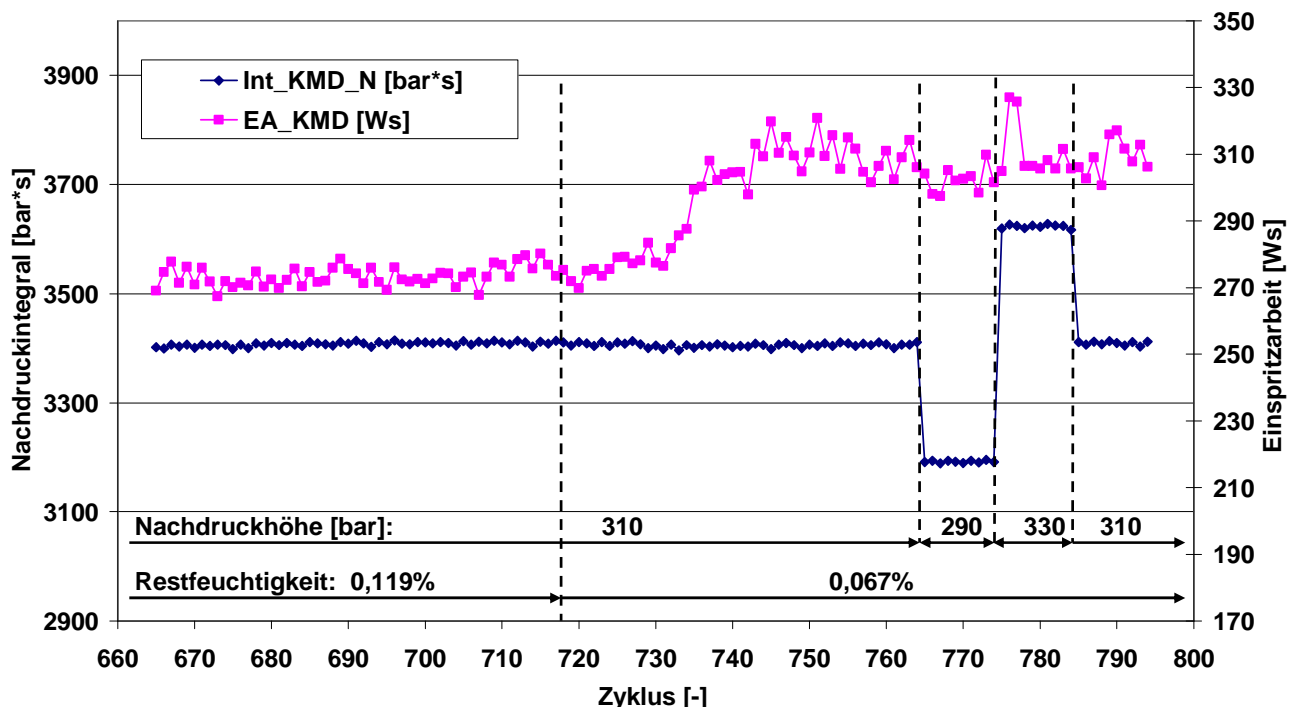


Abbildung 3-37: Nachdruckintegral (KMD) und Einspritzarbeit (KMD), Versuch PBT

Dies hat den Vorteil, dass die Prozessparameter auf Basis der Einspritzphase, die in den vorausgegangenen Untersuchungen die höchsten Reaktionen auf eine Änderung im Rohstoff gezeigt haben, nicht durch diesen Eingriff in den Prozess beeinflusst werden.

In Abbildung 3-37 sind die Parameter Nachdruckintegral [bars] und Einspritzarbeit [Ws] der ersten Versuchsreihe mit PBT dargestellt. Die Unterschiede sind schnell ersichtlich; so reagiert die Einspritzarbeit deutlich auf den Wechsel in der Restfeuchtigkeit des Rohstoffes, wird jedoch nicht durch den Stelleingriff in Form einer geänderten Nachdruckhöhe beeinflusst.

Die in diesem Versuch erzielten Formteilm Gewichte sind in Abbildung 3-38 dargestellt. Zu Beginn der Teileentnahme liegen die Formteilm Gewichte bei 29,36 g und leicht darüber und verringern sich nach dem Wechsel auf weniger feuchtes Material um 0,04 g. Diese Gewichtsabnahme ist hauptsächlich auf ein geändertes Schließverhalten der Rückströmsperre zurückzuführen. Der Effekt der Verringerung der Fließfähigkeit sowie die höheren Druckübertragungsverluste sind von untergeordnetem Charakter.

Der Effekt der Anpassung der Nachdruckhöhe ist deutlich zu erkennen, das Absenken bzw. Anheben der Nachdruckhöhe führt zu einer Gewichtsänderung von ca. $\pm 0,05$ g.

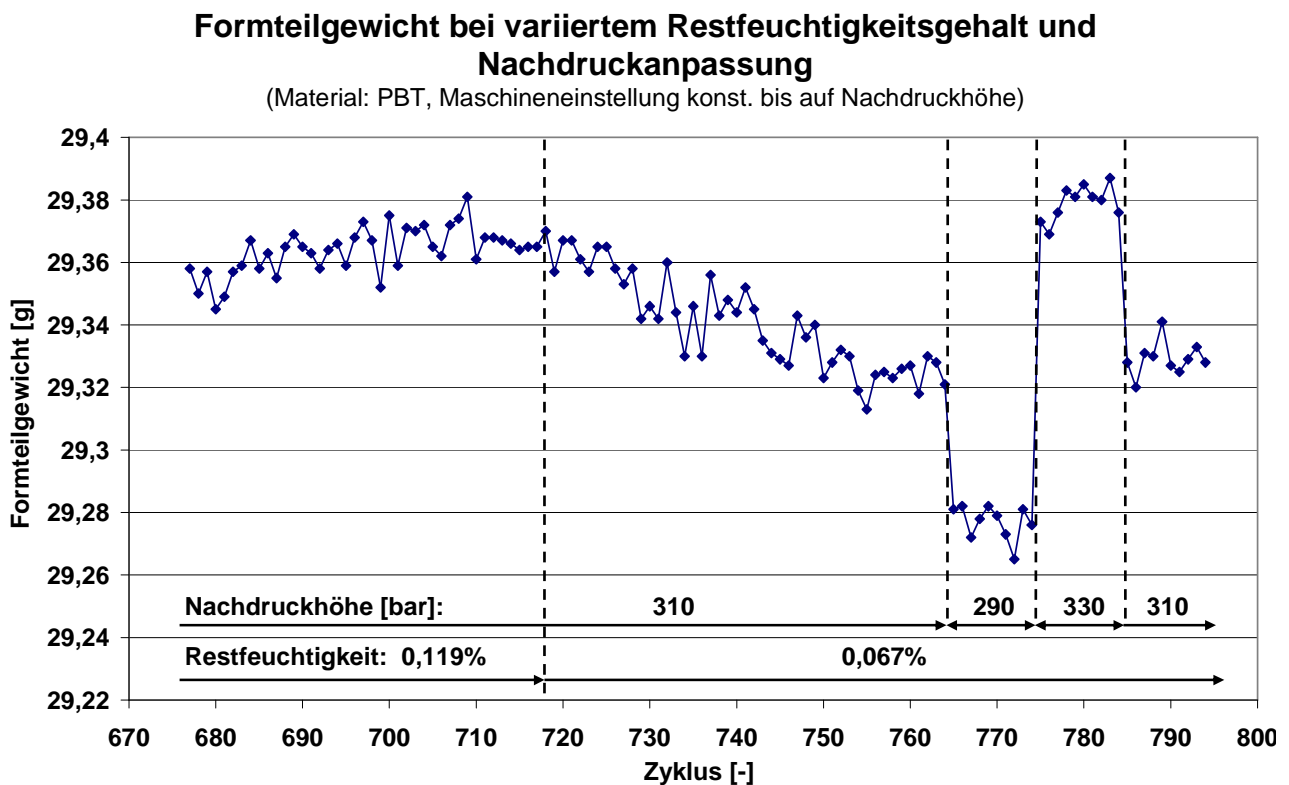


Abbildung 3-38: Formteilm Gewicht bei variiertem Restfeuchtigkeitsgehalt und Nachdruckanpassung (PBT, Farbmusterplatte, Maschineneinstellung konst. bis auf Nachdruckhöhe)

Diese gemessenen Formteilm Gewichte und die in dieser Versuchsreihe ermittelten Prozessparameter wurden für die Erstellung des Prozessmodells verwendet, welches in der im Folgenden dargestellten Versuchsreihe überprüft wird.

Die Modellbildung erfolgte mit dem Verfahren der multiplen linearen Regression, dessen Ergebnis eine Regressionsformel nach Formel 3-17 ist. Der Zielparameter Y hier das

Formteilmgewicht errechnet sich aus einer Konstanten β_0 und den Regressionskoeffizienten $\beta_1 - \beta_n$ multipliziert mit dem jeweiligen Prozessparameter $x_1 - x_n$.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 \dots + \beta_n x_n \quad \text{Formel 3-17}$$

Die Modellparameter und Koeffizienten, die sich bei der Modellbildung ergeben sind, in Tabelle 3-6 abgebildet.

Tabelle 3-6: Regressionsmodell Versuch PBT I

Regressionsmodell		
Material: PBT		
Werkzeug: Doppelplatte		
Zielgröße: Gewicht		
Bestimmtheitsmaß: 91,98%		
Modellparameter	Koeffizient [-]	Koeffizient (normiert) [%]
Konstante	28,619257	
Druckintegral KMD N	0,001925	37,75
Einspritzarbeit KMD	-0,000815	-9,13
Mittelwert Drehmoment N	-0,039050	-26,81
Mittelwert Druck KMD N	0,001520	23,00
Mittelwert Druck KMD P	0,000287	3,31

Das Bestimmtheitsmaß des Prozessmodells erreicht 91,98 %, was bedeutet, dass dieser Prozentwert der im Formteilmgewicht auftretenden Gewichtsschwankungen durch korrelierende Schwankungen der ausgewählten Prozessparameter erklärt werden können. Die beiden zuvor in Abbildung 3-37 dargestellten Prozessparameter Nachdruckintegral und die Einspritzarbeit gehen mit 37,75 % bzw. mit 9,13 % normiert in das Prozessmodell ein.

Auf eine explizite Gegenüberstellung von gemessenen und über das Modell prognostizierten FormteilmGewichten wird hier verzichtet und auf den im nächsten Abschnitt beschriebenen Versuch zur Modellvalidierung verwiesen.

Validierungsversuch des Prozessmodells

Zur Validierung des auf Basis der generierten Datenbasis gebildeten Prognosemodells und damit zum Nachweis des Informationsgehaltes der Energie- und Arbeitsparameter wurde ein Kontrollversuch durchgeführt.

Ziel ist es dabei Eignung der Prozessparameter für eine Qualitätsregelung, wie im Kapitel 2.5.2 beschrieben, nachzuweisen. Bei dem Ansatz einer prognosebasierten Qualitätsregelung wird die für die Rückführung der Regelung notwendige Formteilqualität über ein Pro-

zessmodell prognostiziert. Um ausreichend genaue Prognosewerte zu erhalten, sind Basisdaten von hohem Informationsgehalt über den Prozesszustand notwendig.

In dem Validierungsversuch wird in den konstant laufenden Prozess eine Störung durch einen Wechsel der Restfeuchtigkeit im Granulat eingebracht. Diese Änderung im Prozesszustand soll vom Prozessmodell erkannt und die Auswirkung auf die produzierte Formteilqualität prognostiziert werden. Auf Basis dieser Prognosewerte kann dann über die Nachdruckhöhe (manuell) korrigierend in die Maschineneinstellung eingegriffen werden.

Abbildung 3-39 zeigt die Verläufe der Gewichtsprognose und des gemessenen Formteilgewichtes für die Versuchsreihe. Zu Beginn wird die Spritzgießmaschine betrieben, bis sich ein konstanter Prozess einstellt, wobei das verarbeitete Polymer einen Restfeuchtigkeitsgehalt von 0,067% hat. Im Zyklus 856 wird dann auf ein feuchteres Granulat mit 0,119 % Wasseranteil gewechselt. Circa 10 Produktionszyklen später steigt das prognostizierte Gewicht des Formteils erstmalig an.

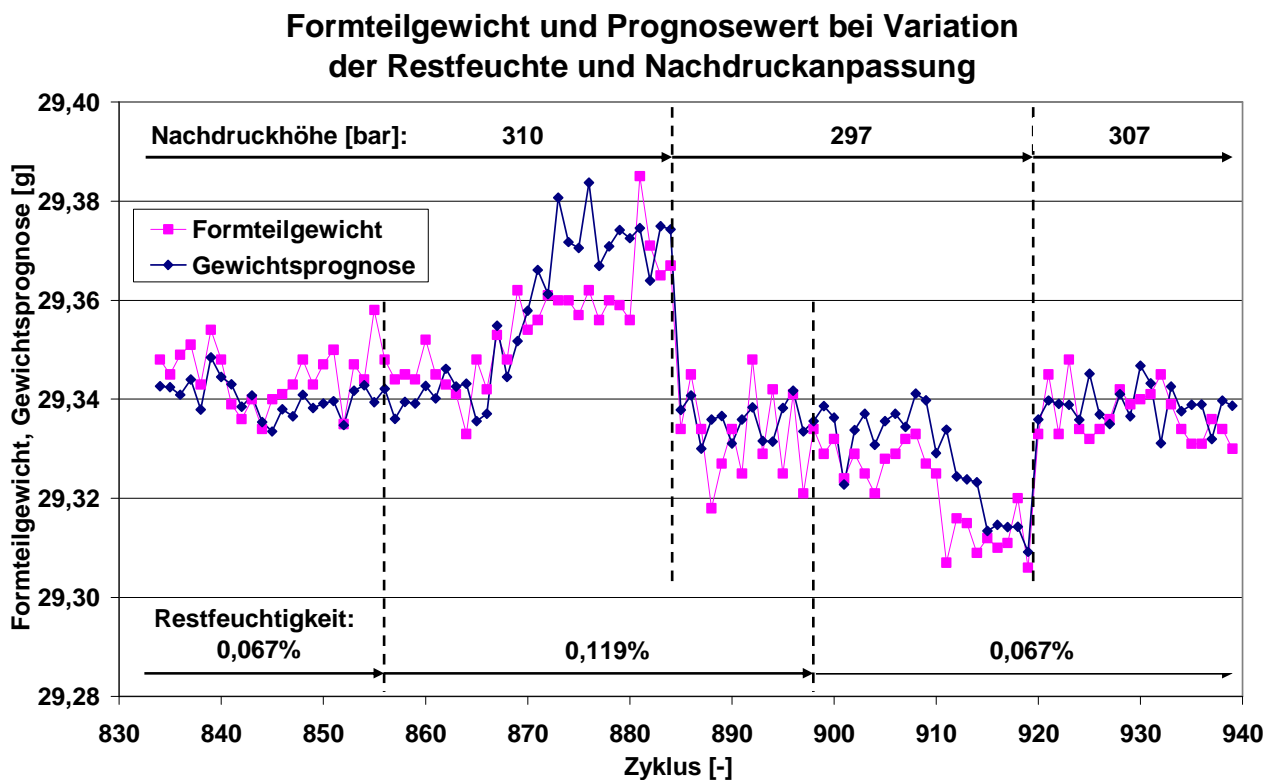


Abbildung 3-39: Bauteilgewicht und Prognosewert bei Variation der Restfeuchte und Nachdruckanpassung (PBT)

Nachdem sich den Prognosewerten nach wieder ein konstantes Gewichtsniveau bei ca. 29,37 g eingestellt hat, wird erstmalig korrigierend eingegriffen. Dazu wird im Zyklus 885 die Nachdruckhöhe um 13 bar auf 297 bar abgesenkt. Der Korrekturwert von 13 bar ist dabei aus dem aus dem ersten Versuch bekannten Zusammenhang zwischen Nachdruckhöhe und dem Bauteilgewicht abgeleitet. Dabei wurde ein linearer Zusammenhang um diesen Betriebspunkt angenommen. Das Prozessmodell erkennt die Änderungen direkt und die Prognosewerte sinken auf ein Niveau von ca. 29,335 g.

Nach weiteren produzierten 13 Zyklen wird wieder auf das Ausgangsmaterial vom Beginn der Versuchsreihe gewechselt, wodurch sich nach ca. 12 Produktionszyklen wiederum eine erste Abnahme der Prognosewerte der Bauteilgewichte zeigt.

Zur Korrektur des Effektes wurde an dieser Stelle eine andere Eingriffsgrenze gewählt. Wurde bei dem ersten Wechsel der Restfeuchte gewartet bis sich ein konstantes Niveau einstellt, wird jetzt eine Gewichtsgrenze vorgegeben.

Liegen die Prognosewerte für fünf aufeinander folgende Produktionszyklen außerhalb der auf 29,32 g festgelegten Grenze, soll korrigierend eingegriffen werden. Nachdem mit dem Zyklus 920 fünf Produktionszyklen unter dem gesetzten Grenzwert lagen, wurde korrigierend eingegriffen und der Nachdruck um 10 bar auf 307 bar angehoben. Dadurch steigen die Prognosewerte des Bauteilgewichtes auf einen Mittelwert von geringfügig unter 29,34 g an. Durch das im Vergleich zum ersten korrigierenden Eingriff frühere Gegensteuern ist der Wert der Korrektur um 3 bar geringer als bei der ersten Korrektur. Dadurch erreichen die Prognosewerte gegen Ende der Versuchsreihe nicht vollständig das Eingangsniveau.

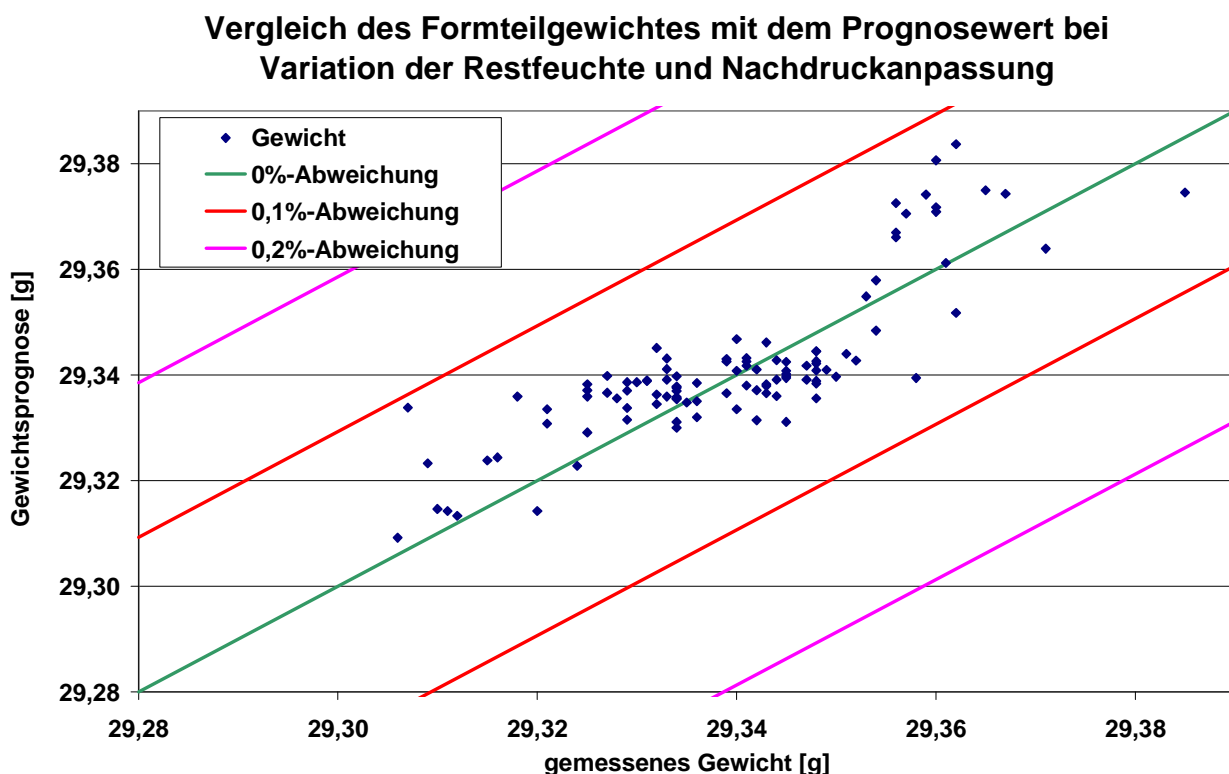


Abbildung 3-40: Vergleich des Formteilgewichtes mit dem Prognosewert bei Variation der Restfeuchtigkeit und Nachdruckanpassung (PBT)

Weiterhin sind in Abbildung 3-39 die nach Abschluss der Versuchsreihe gemessenen Formteilgewichte dargestellt. Es wird deutlich, dass die Gewichtsprognosen den wirklichen Bauteilgewichten sehr gut folgen, sogar geringe Tendenzen des Formteilgewichtes in Bereichen konstanten Betriebes werden vielfach richtig vorausgesagt. Einzig in den Berei-

chen, in denen sich der Betriebspunkt, bedingt durch die eingebrachte Störung, umstellt, sind die Abweichungen zwischen Prognosewert und realem Formteilgewicht leicht größer.

Betrachtet man in Abbildung 3-40 die Gegenüberstellung von Prognosewerten und den gemessenen Formteilgewichten, wird deutlich wie gering die Prognoseabweichungen im Verlauf der Versuchsreihe sind. Sämtliche Prognosewerte erreichen einen Fehler von unter 0,1 %, wobei der größte Teil der Abweichungen innerhalb von 0,05 % liegen.

Die gewählten Prozessparameter sind sehr gut geeignet die durch den Wechsel in der Restfeuchtigkeit des Rohstoffes in den Prozess eingebrachte Störung zu beschreiben.

Auswirkungen einer Zylindertemperaturänderung auf die Modellgültigkeit

Im weiteren Verlauf der Versuchsreihe wurde untersucht wie sich eine Änderung der Zylindertemperatur auf die Qualität der Prognosewerte des Modells auswirkt.

Dazu wird die Spritzgießmaschine zunächst kontinuierlich weiter betrieben und wie in Abbildung 3-41 dargestellt, im Zyklus 942 das Zylindertemperaturprofil um 5 K angehoben. Nach drei produzierten Bauteilen prognostiziert das Prozessmodell erstmals ein steigendes Bauteilgewicht. In diesem Fall wird als Eingriffsgrenze ein Gewichtsprognosewert von 29,36 g festgelegt. Übersteigt der Prognosewert fünfmal in Folge den Grenzwert, wird eine Korrektur ausgelöst. Im Zyklus 953 wird der Nachdruck um 13 bar gesenkt, wodurch die Prognosewerte sogleich um 0,04 g fallen. Im Bereich nach dem Eingriff ist eine deutlich vergrößerte Streubreite der prognostizierten Formteilgewichte zu verzeichnen. Ein Teil dieser Schwankungen ist auf den durch die Störung in Form der Zylindertemperatursteigerung veränderten Betriebspunkt zurückzuführen, den das Prognosemodell nur schlecht abbilden kann. Da auch die Formteilgewichtsschwankungen in diesem Bereich höher ausfallen, wird deutlich, dass die Prognosewerte dennoch einen Zusammenhang zum realen Prozess haben.

Im Verlauf von Zyklus 969 wurde das Zylindertemperaturprofil wieder um 5 K auf den Ursprungswert abgesenkt. Nach einer kurzen Verzugsphase, in der die Prognosewerte noch stark schwanken, fallen die prognostizierten Formteilgewichte kontinuierlich ab und die Streubreite verringert sich. Als Grenzwert für einen Korrektureingriff wird ein Formteilgewicht von 29,32 g gewählt. Der Eingriff über die Nachdruckhöhe wird in Zyklus 985 vorgenommen, so dass die prognostizierten Formteilgewichte wieder auf das Ursprungsniveau ansteigen.

Die gemessenen Formteilgewichte sind ebenfalls in Abbildung 3-41 dargestellt, zu Beginn und am Ende der Versuchsreihe sind die Abweichungen sehr gering. Mit Wirken der Zylindertemperaturerhöhung steigen die Abweichungen, die erst nach dem Rückstellen der Zylindertemperaturen wieder abnehmen.

Formteilgewicht und Prognose bei Variation der Zylindertemperatur und Nachdruckanpassung

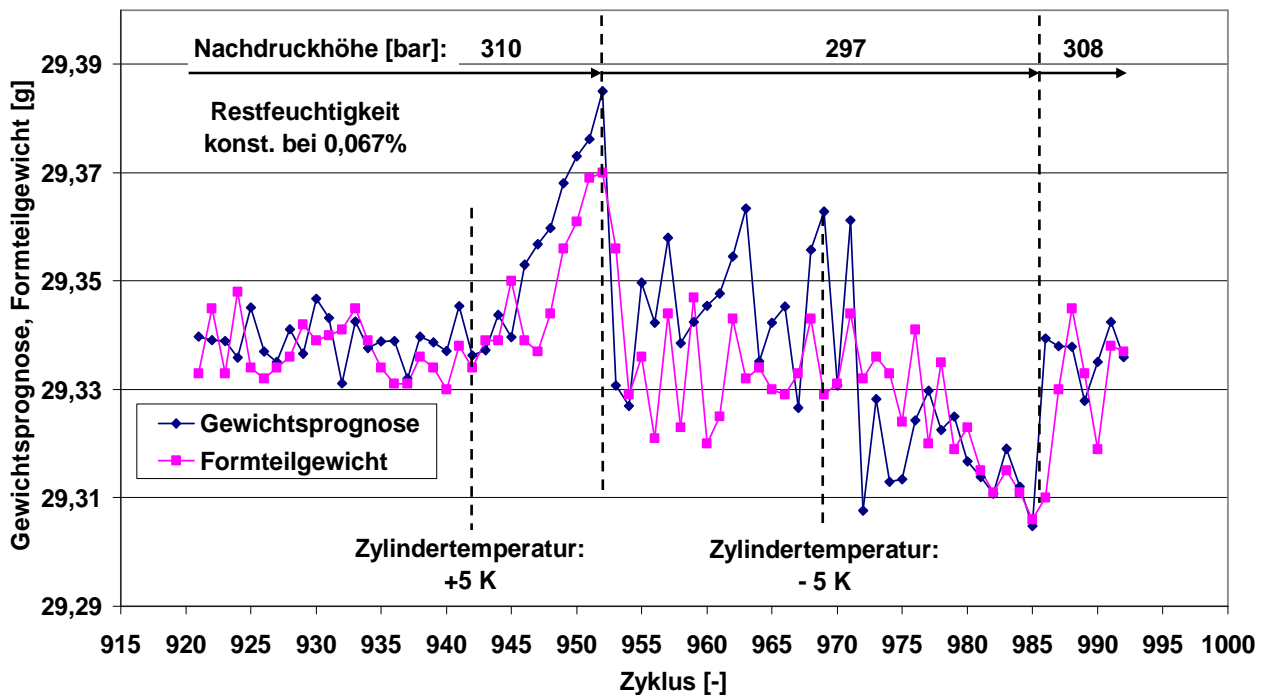


Abbildung 3-41: Formteilgewicht und Prognose bei Variation der Zylindertemperatur und Nachdruckanpassung (PBT)

Vergleich des Formteilgewichtes mit dem Prognosewert bei Variation der Zylindertemperatur und Nachdruckanpassung

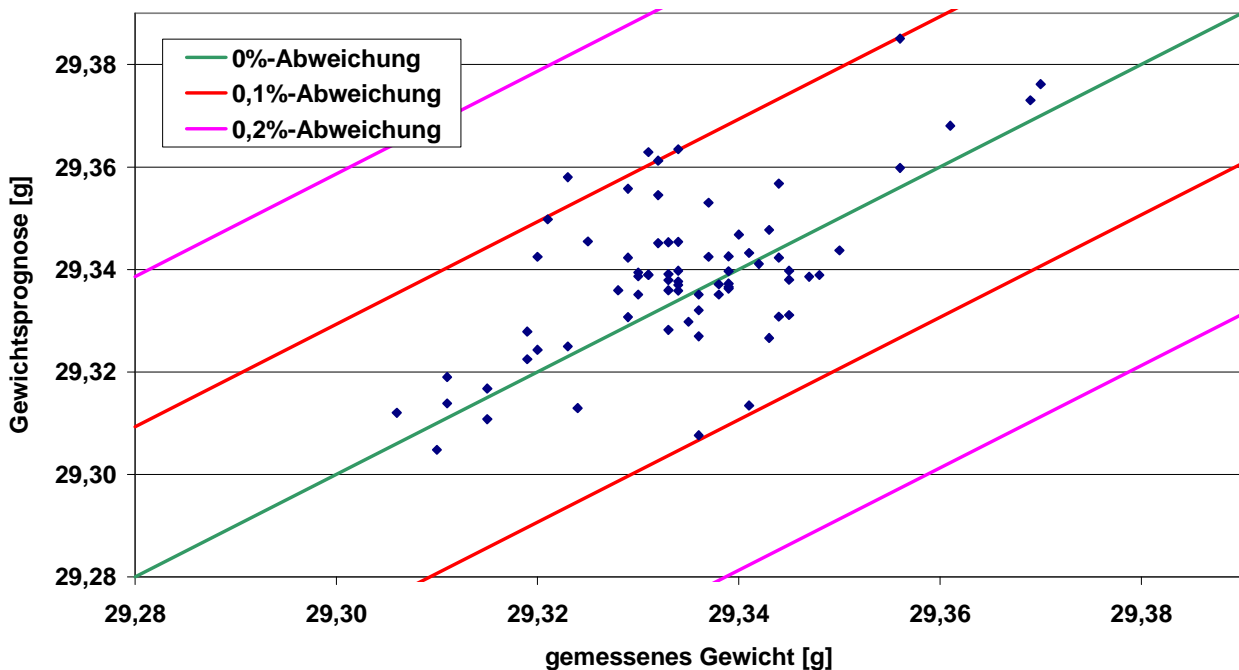


Abbildung 3-42: Vergleich des Formteilgewichtes mit dem Prognosewert bei Variation der Zylindertemperatur und Nachdruckanpassung (PBT)

Betrachtet man den Vergleich der gemessenen und prognostizierten Formteilgewichte in der Gegenüberstellung in Abbildung 3-42 kann man sagen, dass die auftretenden Fehler geringfügig größer sind als bei dem Wechsel der Restfeuchtigkeit im Rohstoff. Bis auf wenige Ausnahmen liegen die Fehler unterhalb von 0,1 % Abweichung. Im direkten Vergleich zu Abbildung 3-40 sind die Wertepaare dagegen breiter gestreut.

3.5.2 Versuchsreihe mit Polybutylenterephthalat II

In der praktischen Anwendung stellt der für das Erstellen einer Datenbasis für ein Prozessmodell notwendige Aufwand ein größeres Hindernis dar. Besonders wenn, wie im zuvor beschriebenen Versuch, ein Rohstoff gezielt konditioniert werden muss, um damit die Prozessstörung zu simulieren.

In einer weiteren Versuchsreihe soll ein „Viskositätsdefekt“ wie er typischerweise von einer Restfeuchtigkeits- oder Chargenschwankung verursacht wird, über eine gezielte Variation der Zylindertemperatur simuliert werden. So ließe sich der Versuchsaufwand zur Erstellung der Datenbasis für das Prognosemodell deutlich verringern. Die notwendige Datenbasis könnte im Rahmen des Produktionsanlaufes generiert werden.

In Abbildung 3-43 ist das Formteilgewicht dieser Versuchsreihe dargestellt. Im Zyklus 2910 werden die Sollwerte des Zylindertemperaturprofils um 5 K abgesenkt, wodurch sich nach einigen Produktionszyklen Verzögerung durch eine angestiegene Schmelzeviskosität die Formteilmasse um 0,02 g verringert.

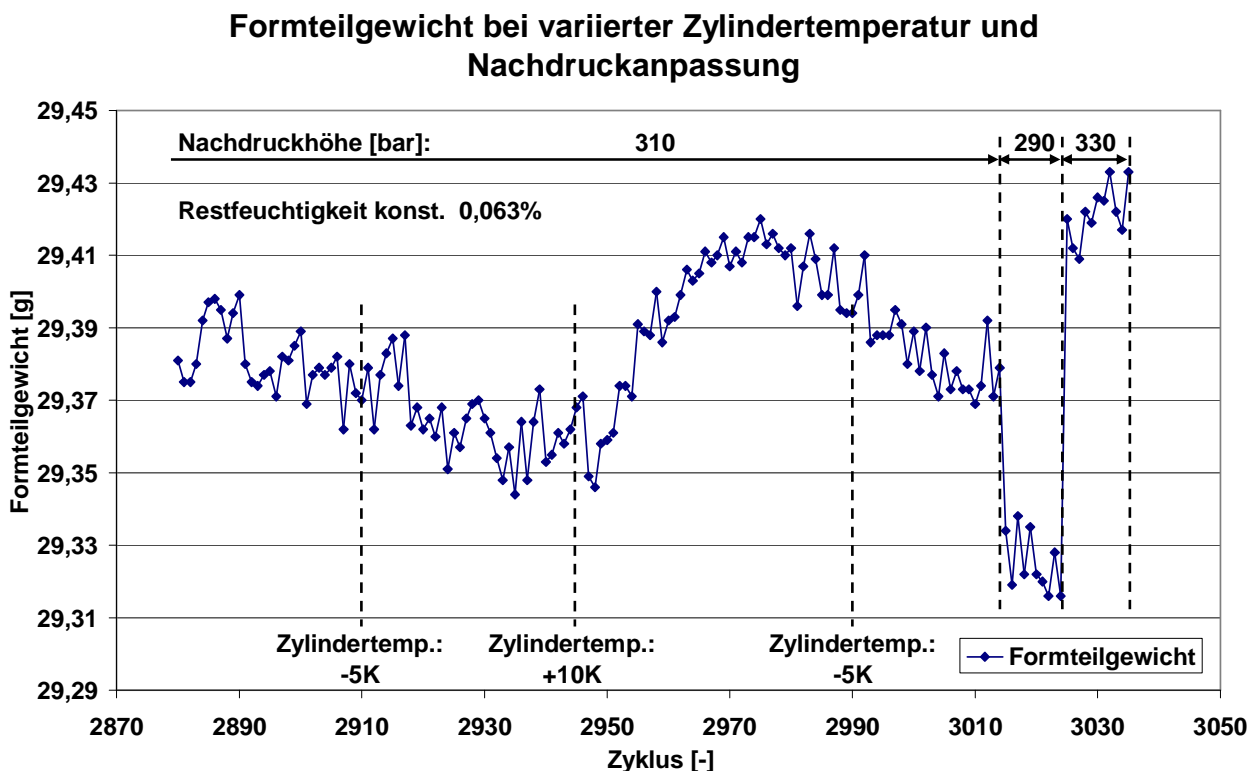


Abbildung 3-43: Formteilgewicht bei variiertem Zylindertemperatur und Nachdruckanpassung

Nachdem sich wieder ein beständiger Betriebspunkt eingestellt hat, werden die Zylinder-temperatursollwerte um 10 K angehoben. Das kurzzeitige Überschwingen der Formteilgewichte über einen Wert von 29,41 g kann auf das Regelverhalten der Zylinderheizung zurückgeführt werden. Die Ist-Werte der Zylindertemperaturen schwingen bei einem derartigen Sollwertsprung geringfügig über den Soll-Wert hinaus.

Nachdem sich auch bei dem nun erhöhten Temperaturprofil ein konstanter Betriebszustand eingestellt hat, werden die Sollwerte wieder auf die des Ursprungsprofils zurückgesetzt. Das ursprüngliche Formteilgewicht wird nach etwa zehn Produktionszyklen wieder erreicht.

Am Ende der Versuchsreihe wird noch die Nachdruckhöhe variiert, um den Zusammenhang zwischen der möglichen Stellgröße und dem Qualitätsmerkmal im Prozessmodell abbilden zu können.

Mit den in der Versuchsreihe über eine Temperaturänderung des Einspritzzylinders generierten Prozessdaten und den Formteilgewichten wurde dann das in Tabelle 3-7 dargestellte multiple Regressionsmodell erstellt. Die Haupteinflussparameter sind dabei das Druckintegral in der Nachdruckphase (gemessen an der Kraftmessdose am Schnecken-schaft) mit 68,21 % Anteil und das mittlere Drehmoment des Einspritzantriebes in der Nachdruckphase mit 26,64 %. Das Bestimmtheitsmaß erreicht einen Wert von 92,99 %.

Tabelle 3-7: Regressionsmodell Versuch PBT

Regressionsmodell		
Material: PBT		
Werkzeug: Doppelplatte		
Zielgröße: Gewicht		
Bestimmtheitsmaß: 92,99%		
Modellparameter	Koeffizient [-]	Koeffizient (normiert) [%]
Konstante	28,705015	
Druckintegral KMD N	0,000366	68,21
Fließzahl KMD	-0,000646	-4,62
Mittelwert Drehmoment N	-0,030218	-26,64
Nachdruckarbeit KMD	-0,000542	-0,46
Staudruckarbeit	-0,000397	-0,07

Das Regressionsmodell wurde im weiteren Verlauf der Versuchsreihe eingesetzt, um das Formteilgewicht zu prognostizieren. Dabei wird in dieser Versuchsreihe eine Störung in Form eines Wechsels des Restfeuchtigkeitsgehaltes verwendet. Ziel ist es, bewerten zu können, inwieweit das über eine Zylindertemperaturvariation gebildete Prozessmodell diese Störung erkennen kann.

Formteilgewicht und Prognose bei Variation des Restfeuchtegehaltes

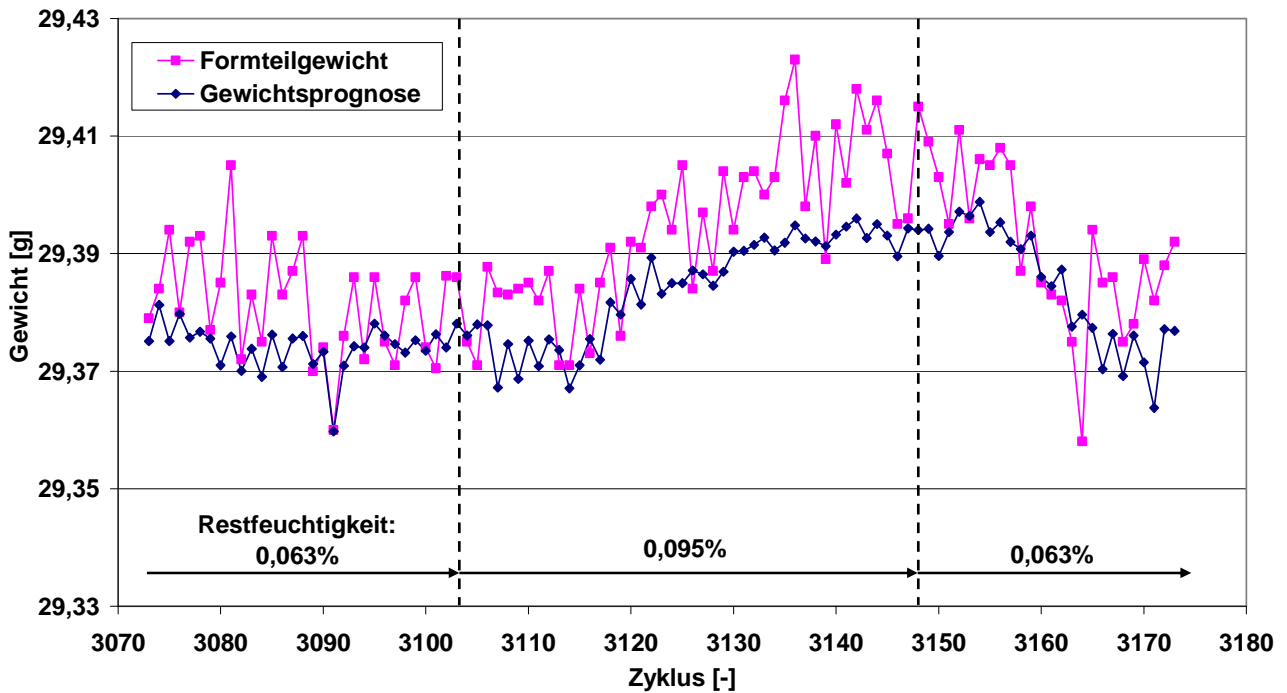


Abbildung 3-44: Formteilgewicht und Prognose bei Variation des Restfeuchtegehaltes

Vergleich des Formteilgewichtes mit dem Prognosewert bei Variation des Restfeuchtigkeit

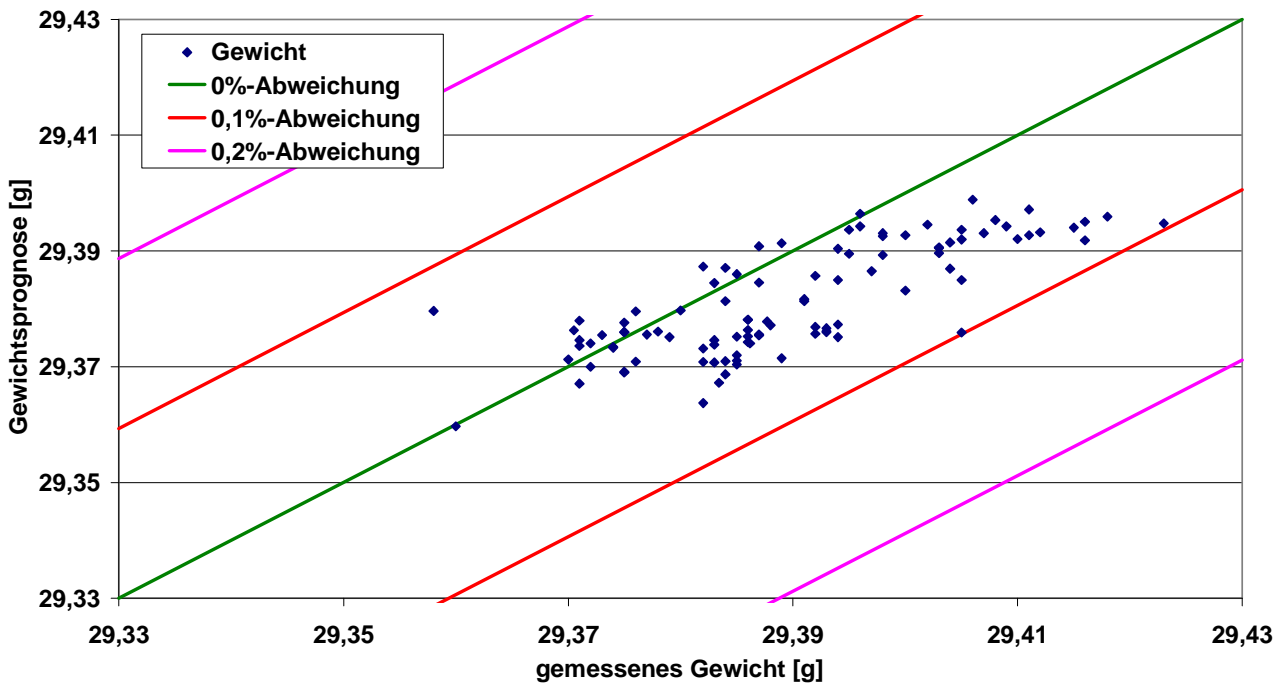


Abbildung 3-45: Vergleich des Formteilgewichtes mit dem Prognosewert bei Variation der Restfeuchtigkeit (PBT)

Das Ergebnis der Versuchsreihe in Form der prognostizierten sowie der gemessenen Formteilgewichte ist in Abbildung 3-44 dargestellt. Zu Beginn wird der Rohstoff bei einer Restfeuchtigkeit von 0,063 % verarbeitet, um dann im Zyklus 3103 auf einen Restfeuchtigkeitsgehalt von 0,095 % zu wechseln. Durch den gesteigerten Anteil an Feuchtigkeit im Polymer wird die Schmelzeviskosität verringert und die Formteilmasse steigt. Wird wieder auf den ursprünglichen Restfeuchtigkeitsgehalt zurückgewechselt, verringert sich das Formteilgewicht auf das ursprüngliche Niveau.

Die prognostizierten Bauteilgewichte liegen insgesamt leicht unter den wirklichen Formteilgewichten, was sich auch in der Gegenüberstellung in Abbildung 3-45 in der Rechtsverschiebung der Punktwolke zeigt. Diese Abweichung ließe sich durch eine Modelladaption korrigieren. Der sonstige qualitative und quantitative Verlauf der Prognosewerte entspricht gut dem Verlauf der gemessenen Formteilgewichte. Die Prognosewerte können die kurzzeitigen Schwankungen der realen Formteilgewichte nur bedingt wiedergeben. So sind die Schwankungen der Prognosewerte deutlich geringer als die der gemessenen Formteilgewichte.

Zusammenfassend kann man sagen, dass bei dem betrachteten Prozess das über eine Variation der Zylindertemperatur erstellte Prozessmodell in der Lage ist auch andere, die Viskosität beeinflussende Störungen wie einen Wechsel des Restfeuchtegehaltes, anhand der Prozessdaten zu erkennen. Inwiefern dieser Ansatz auf andere Formteile und Rohstoffe übertragbar ist kann auf der Basis dieser Versuchsreihe nicht bewertet werden.

4 Alternative Ansätze zur Prozessführung an Spritzgießmaschinen

Aktuelle elektromechanisch angetriebene Spritzgießmaschinen verfügen heute über präzise Achsantriebe, die in der Lage sind, hohe Reproduzierbarkeiten zu erreichen. Die Prozessführung, die den Bewegungsablauf der Einspritzachse vorgibt, basiert dabei heute auf den Möglichkeiten von elektrohydraulisch angetriebenen Spritzgießmaschinen. An eine geschwindigkeitsgeregelte Einspritzphase schließt sich eine Phase mit geregelter (Hydraulik-) Druck an. Im Rahmen dieser Arbeit werden Möglichkeiten einer alternativen Prozessführung zur Formteilbildung untersucht, die besser an die Möglichkeiten von elektromechanischen Achsen angepasst sind und das vorhandene Potential ausnutzen. So verfügen elektromechanische Antriebsachsen standardmäßig über eine hochauflösende Sensorik, die zum einen für die Regelung der Antriebe notwendig ist und zum anderen für eine alternative Prozessführung verwendet werden kann.

Weiterhin haben elektromechanische Achsen auch prinzipbedingte Unterschiede zu elektrohydraulischen Achsen. Betrachtet man die Positions- oder Geschwindigkeitsverläufe am Umschaltunkt des Standardspritzgießprozesses, so kommt es hier vielfach zu hohen Beschleunigungen der Antriebsachse. Dabei wird die Schnecke häufig zum schnellen Erreichen des eingestellten Nachdruckniveaus zurückgezogen. Bei hydraulischen Antrieben wird das Zurückziehen der Schnecke oft schon über die Kompressibilität des Systems realisiert bzw. über ein einfaches Rückfließen des Druckmediums bewältigt. Bei elektromechanisch angetriebenen Einspritzachsen sind die auftretenden Belastungen insbesondere der Kugelumlaufspindel, die die Drehbewegung des Motors in eine translatorische Bewegung wandelt, äußerst hoch. Diese Betriebsweise wirkt sich nach heutigem Stand der Technik nachteilig auf die Lebensdauer der Maschinenelemente aus [Ja08], ist jedoch aus Prozesssicht nicht zwingend erforderlich.

Zur Realisierung der Einspritzbewegung sind verschiedene Verfahrensvarianten denkbar. Ein erster Ansatz ist es, den Formfüll- und Schwindungsausgleichshub vollständig über ein Weg-Geschwindigkeitsprofil vorzugeben. In jedem Produktionszyklus soll so ein möglichst identischer Positionsverlauf erreicht werden. Dabei ist zu erwarten, dass Abweichungen in der Qualität der plastifizierten Schmelze oder im Betriebsverhalten der Rückströmsperre sofort zu abweichenden Druckniveaus in der Kompressions- und Schwindungsausgleichsphase führen. Aus diesem Grund muss über die in der Maschine vorhandene Sensorik die Abweichung in jedem Zyklus erkannt und der Schneckenhub entsprechend korrigiert werden.

Eine weitere Verfahrensvariante ist das Weg-Geschwindigkeitsprofil bis in den Kompressionsbereich derart vorzugeben, dass der Wechsel auf eine druckgeführte Ausgleichsphase bei geringen Verfahrgeschwindigkeiten erfolgt. So würde die Belastung der Maschinenelemente des Achsantriebs deutlich reduziert. Aufgrund der geringeren Geschwindigkeiten am Umschaltunkt sind bei dieser Verfahrensvariante außerdem höhere Reproduzierbarkeiten der Umschaltposition zu erwarten. Im Rahmen dieser Arbeit war eine detaillierte Untersuchung dieses hybriden Verfahrens nicht möglich, da die Versuchsmaschine diese Prozessführung nicht unterstützte. Mit den für einen Standardspritzgießprozess optimier-

ten Regelungs- und Maschinenparametern war es nicht möglich einen Betriebspunkt zu finden, an dem die Prozesskonstanz höher als im Standardprozess war.

Zur Durchführung der Versuchsreihe wurde die in Kapitel 3.1.1 beschriebene elektromechanisch angetriebene Spritzgießmaschine verwendet. Um neben dem Standardprozess ein entsprechendes Weg-Geschwindigkeitsprofil für den Einspritzvorgang vorgeben zu können, wurde die Steuerungssoftware der Maschine angepasst. Zur Erstellung eines Geschwindigkeitsprofils für die Untersuchung wird jeweils ein Schneckenpositionsverlauf, der auf konventionelle Weise ermittelt wurde, als Basis verwendet. Über den externen Messaufbau wird ein Schneckenpositionsverlauf eines konventionellen Spritzgießzyklus aufgezeichnet, um daraus mittels einer Auswerteroutine ein äquivalentes Weg-Geschwindigkeitsprofil abzuleiten.

Im Folgenden wird zuerst der Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Prozess vorgestellt und dem Standardspritzgießprozess gegenübergestellt. Daran schließt sich eine Betrachtung der Reproduzierfähigkeit der Einspritzbewegung für beide Prozessfahrweisen an. Für den vollständig Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Prozess werden Untersuchungen zur erreichbaren Prozesskonstanz vorgestellt. Abschließend werden die spezifischen Reaktionen beider Verfahrensweisen auf eine rohstoffinduzierte Viskositätsstörung untersucht, um dann auf Möglichkeiten für einen aktiven korrigierenden Eingriff in die Achsbewegung vorzustellen.

4.1 Standardprozess und Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Einspritzvorgang

Der Wechsel vom Standardprozess zu einem Weg-Zeit gesteuerten Prozess bedingt verschiedene Änderungen in der Bewertung von Prozessparametern und der Prozessqualität. Ein direkter Vergleich der beiden Prozessführungsvarianten ist nur in eingeschränktem Umfang möglich, weshalb im Folgenden einige grundlegende Unterschiede der Prozesse dargestellt werden. Auf eine detaillierte Darstellung des Verfahrensablaufes eines Standardspritzgießprozesses wird hier verzichtet. Stattdessen wird auf die wesentlichen Unterschiede eingegangen.

In Abbildung 4-1 ist für einen Standardspritzgießprozess der zeitliche Verlauf der Schneckenposition von 20 aufeinanderfolgenden Produktionszyklen überlagert dargestellt. Weiter ist der Variationskoeffizient, gebildet aus diesen Verläufen, abgebildet. Da es ablaufbedingt bei der Messdatenaufnahme zu Zeitverschiebungen kommt, wurden für die Auswertung alle Datensätze der betrachteten Zyklen zeitlich auf den Start des Einspritzvorganges normiert. Der stellenweise sprunghafte Verlauf des Variationskoeffizienten ist auf die endliche Auflösung des Positionsmesssystems und die damit verbundene Diskretisierung des Signals zurückzuführen.

Zeitlicher Verlauf der Schneckenposition und des Variationskoeffizienten (jeweils für 20 Zyklen)

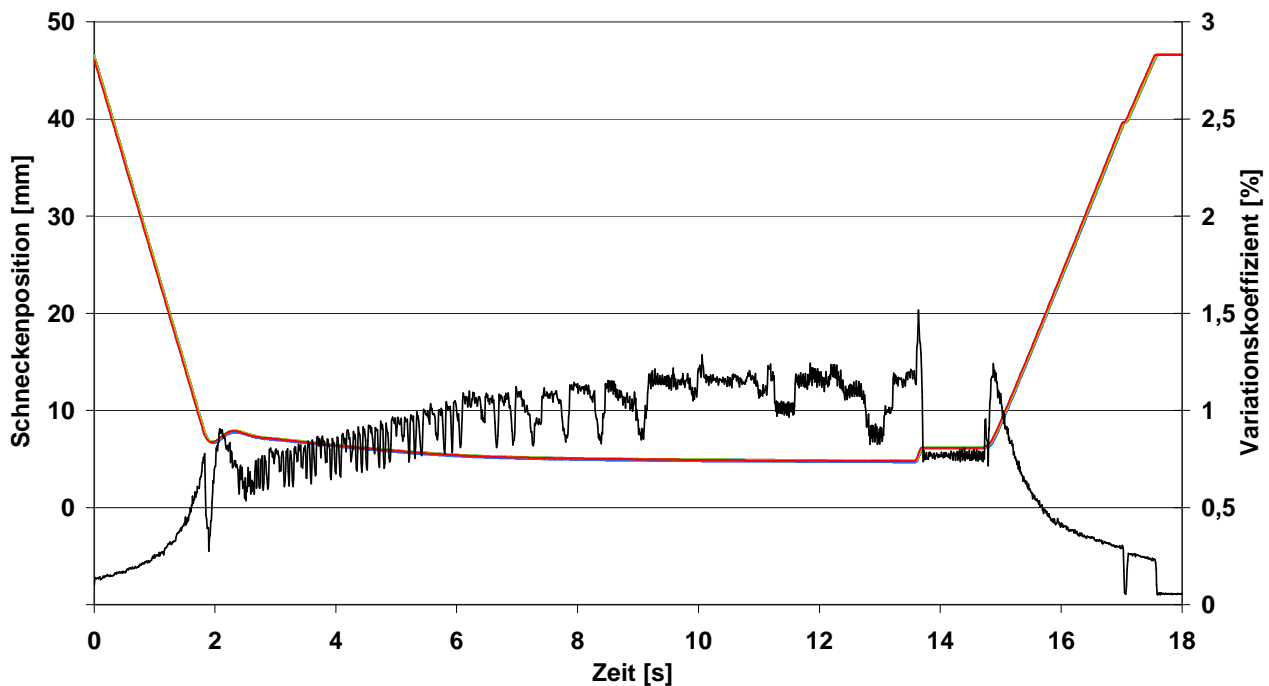


Abbildung 4-1: Zeitlicher Verlauf der Schneckenposition im Standardprozess und des Variationskoeffizienten (Material PE, 20 Zyklen überlagert)

Deutlich zu erkennen sind geringe Variationskoeffizienten und damit Abweichungen von maximal 0,7 % in der Formfüllphase sowie ein höchst reproduzierbares Erreichen der minimalen Schneckenposition.

Im weiteren Verlauf der Nachdruckphase steigen die Variationskoeffizienten leicht an, ab der Mitte der Nachdruckzeit wird eine Abweichung von ca. 1,2 % erreicht. Das Ansteigen der Variationskoeffizienten ist auf die Abläufe beim Standardspritzgießprozess zurückzuführen. Unterschiede in der Qualität der plastifizierten Schmelze sowie Abweichungen im Schließverhalten der Rückströmsperre führen zu abweichenden Schneckenpositionsverläufen in der druckgeregelten Nachdruckphase. In Standard-Prozessparametern ausgedrückt handelt es sich dabei um geringe Schwankungen des Restmassepolsters. Ein Variationskoeffizient von 1,2 % am Ende der Nachdruckphase entspricht hier bei einem Restmassepolster von 7 mm einer Streubreite von 0,084 mm.

Im Bereich des Entlastungshubes nach der Nachdruckphase erreicht der Variationskoeffizient Werte von 0,75 %. In der Dosierphase sinken die Werte der Variationskoeffizienten stetig, um dann beim Erreichen der hinteren Schneckenposition auf annähernd Null zu fallen. Die hintere Endlage der Schnecke wird somit mit sehr hoher Positioniergenauigkeit erreicht.

Durch die unterschiedliche Sollwertvorgabe bei Weg-Geschwindigkeitgesteuerter Prozessfahrweise zeigen die Schneckenpositionsverläufe sowie die erreichten Variationskoeffizienten wie in Abbildung 4-2 zu sehen eine abweichende Charakteristik. Durch die Vorga-

be eines Geschwindigkeitsverlaufes für den gesamten Schneckenhub anstelle einer druckgeregelten Phase sind die erreichten Variationskoeffizienten in der Formfüll- und Schwindungsausgleichsphase gering. Die Abweichungen im Schneckenpositionsverlauf sind ausschließlich von der Reproduzierfähigkeit der Einspritzachse abhängig und werden, sofern die Maschine durch eine Viskositätsänderung der Schmelze nicht an eine Leistungsgrenze gelangt, nicht durch äußere Prozesse beeinflusst. Prozesse, die im Standardspritzgießprozess zu Massepolsterschwankungen führen, resultieren bei einer Weg-Geschwindigkeitsgeregelten Betriebsweise in abweichenden Druckprofilen in der Schwindungsausgleichsphase.

Die Werte der Variationskoeffizienten in der Formfüllphase liegen auf ähnlichem Niveau wie die des Standardprozesses. In der Schwindungsausgleichsphase liegen die erreichten Variationskoeffizienten aus zuvor genannten Gründen auf sehr niedrigem Niveau.

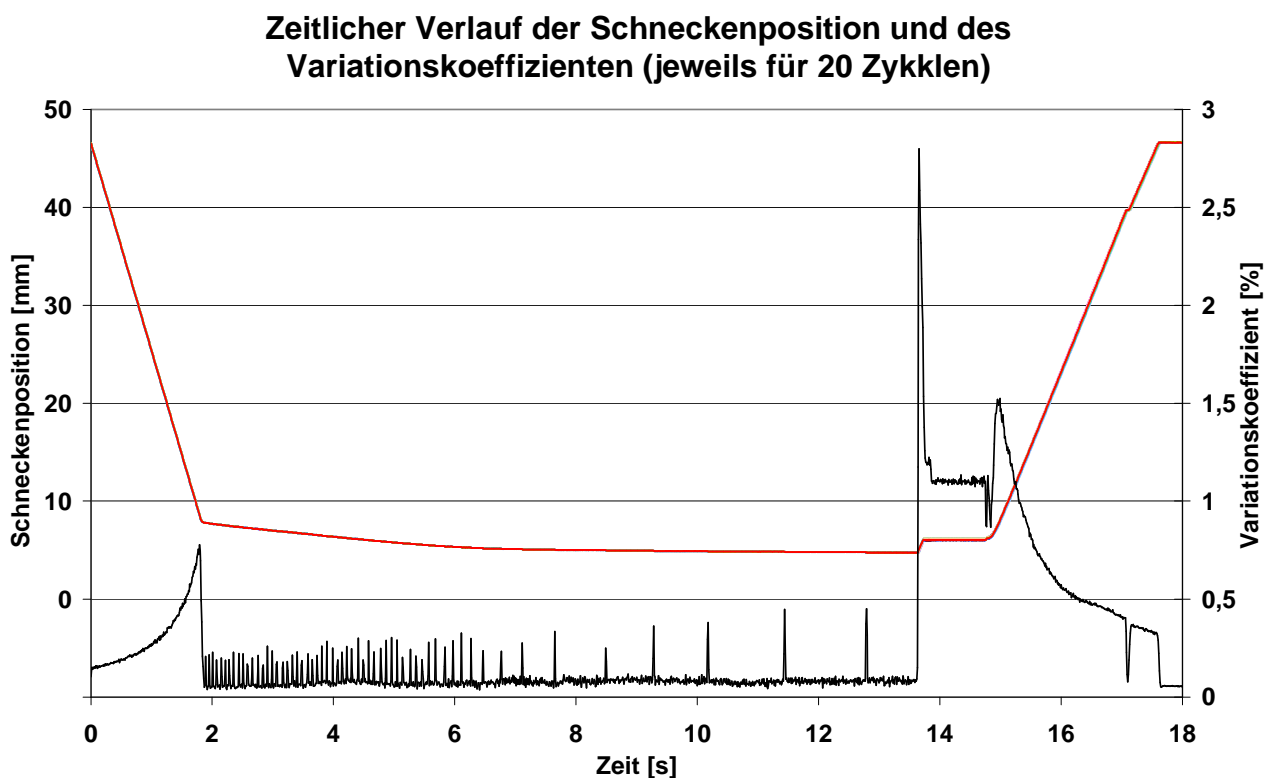


Abbildung 4-2: Zeitlicher Verlauf der Schneckenposition mit Weg-Geschwindigkeitsprofil und des Variationskoeffizienten (Material PE, 20 Zyklen überlagert)

Die Streuung im Entlastungshub nach der Formteilbildung liegt bei Weg-Geschwindigkeitsgeregeltem Betrieb leicht höher, was nach den bisherigen Ergebnissen auf die schwankenden Druckniveaus zu diesem Zeitpunkt im Prozess zurückzuführen ist. Im Standardprozess ist der Druck am Ende der Nachdruckphase immer auf dem gleichen Druckniveau und der notwendige Entlastungshub ist vergleichsweise konstant.

Im Verlauf des Plastifizierungsvorgangs nehmen die Variationskoeffizienten wie zuvor bei dem Standardspritzgießprozess ab. Die hintere Schneckenendlage wird bei einer Weg-Geschwindigkeitsgeregelten Betriebsweise ebenfalls mit sehr geringen Abweichungen erreicht.

Anhand der Schneckenpositionsverläufe der beiden dargestellten Verfahrensweisen wird deutlich, dass ein direkter Vergleich nur bedingt möglich ist. Weiterhin hat die Prozessfahrweise einen Einfluss auf den Informationsgehalt von Prozessparametern. So kann z.B. das Restmassepolster bei Weg-Geschwindigkeitsgeregelten Einspritzprozessen nicht mehr zur Prozessüberwachung verwendet werden.

Wie bereits dargestellt wurde, verursachen selbst geringe Viskositätsschwankungen im verarbeiteten Rohstoff entscheidende Änderungen im Betriebsverhalten einer Einspritzeinheit. Ein wichtiger Einfluss ist dabei das Schließverhalten der Rückströmsperre. Die Auswertung von Druck- und Positionsverläufen zeigte, dass es bereits ohne ein direktes Einwirken einer Störung zu messbaren Abweichungen im Schließverhalten kommt. Diese Ungenauigkeiten werden im Standardprozess durch die druckgeführte Nachdruckphase kompensiert. Bei Weg-Geschwindigkeitgeführtem Betrieb führen diese Abweichungen durch den in jedem Produktionszyklus konstanten Einspritzhub zu abweichenden Druckniveaus in der Phase des Schwindungsausgleichs, was zu Abweichungen der Formteileigenschaften führt. Aus diesem Grund muss bei einem Weg-Geschwindigkeitsgeregelten Prozess durch andere kompensatorische Maßnahmen korrigierend eingegriffen werden. (siehe dazu Kapitel 4.5)

4.2 Reproduzierbarkeit der Schneckenbewegung

Zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit der Schneckenbewegung in der Einspritzphase im Standard- und im Weg-Geschwindigkeitsgeregelten Prozess wurde die Maschine mit einem speziellen Rahmenwerkzeug eingerüstet. Bei diesem Werkzeug wird die Kunststoffschmelze aus der Düse der Einspritzeinheit ins Freie ausgespritzt. Um die Versuchsreihen bei unterschiedlichen Druckniveaus durchführen zu können, wurde außerdem eine Drosseldüse verwendet.

Bei der Versuchsdurchführung wurden zunächst für den Standardprozess die verschiedenen Betriebspunkte angefahren. Dabei werden der Düsenwiderstand und damit das erreichte Druckniveau in der Einspritzphase sowie die Einspritzgeschwindigkeit in drei Stufen variiert.

In Tabelle 4-1 sind die Maschineneinstellungen und die erreichten Druckniveaus der Versuchsreihen dargestellt. Die Nachdruckhöhe wurde in allen Versuchsreihen auf einen Wert von 200 bar eingestellt. Je nach eingestellter Einspritzgeschwindigkeit und der Höhe des Drosselwiderstandes ergeben sich Druckunterschiede von 245 bis zu 800 bar, die am Umschaltpunkt auszugleichen sind. Die Nachdruckdauer wurde auf 15 Sekunden festgelegt, das Dosiervolumen liegt bei 32 ccm, was einer Schneckenposition von 48 mm entspricht.

Tabelle 4-1: Versuchsplan zur Reproduzierbarkeit der Schneckenbewegung in Standard- und Weg-Geschwindigkeitsgeregeltem Prozess

Standardspritzgießprozess							
	Drosselwiderstand	Einspritzgeschwindigkeit	$p_{\text{ein_max}}$ [bar]	dV/dt [ccm/s]	p_N [bar]	t_N [s]	V_{dos} [ccm]
1	-	+	~ 670	20	200	15	32
2	-	o	~ 535	10	200	15	32
3	-	-	~ 445	5	200	15	32
4	o	+	~ 800	20	200	15	32
5	o	o	~ 625	10	200	15	32
6	o	-	~ 500	5	200	15	32
7	+	+	~ 1000	20	200	10	32
8	+	o	~ 775	10	200	10	32
9	+	-	~ 615	5	200	10	32

Weg-Geschwindigkeitsprofil							
	Drosselwiderstand	Einspritzgeschwindigkeit	$p_{\text{ein_max}}$ [bar]	dV/dt [ccm/s]	p_N [bar]	t_N [s]	V_{dos} [ccm]
1	-	+	~ 670	Profil 1	~ 200	(15) 0	32
2	-	o	~ 535	Profil 2	~ 205	(15) 0	32
3	-	-	~ 445	Profil 3	~ 210	(15) 0	32
4	o	+	~ 800	Profil 4	~ 205	(15) 0	32
5	o	o	~ 625	Profil 5	~ 210	(15) 0	32
6	o	-	~ 505	Profil 6	~ 215	(15) 0	32
7	+	+	~ 980	Profil 7	~ 205	(10) 0	32
8	+	o	~ 775	Profil 8	~ 205	(10) 0	32
9	+	-	~ 620	Profil 9	~ 210	(10) 0	32

Die Weg-Geschwindigkeitsprofile der entsprechenden Versuchsreihen wurden aus den in den Standardversuchsreihen aufgezeichneten Schneckenpositionsverläufen abgeleitet. Da die Nachdruckhöhe bei dieser Betriebsweise über die Geschwindigkeit in dieser Prozessphase einzustellen ist, kommt es hier zu geringen Abweichungen. Die Druckunterschiede zwischen Formfüll- und Nachdruckphase sind im Vergleich dazu jedoch sehr hoch, weshalb dieser Einfluss hier zu vernachlässigen ist. Die Geschwindigkeit in der Schwindungsausgleichsphase (entsprechend der Nachdruckphase im Standardprozess) wurde so eingestellt, dass eine äquivalente Nachdruckzeit von 15 Sekunden erreicht wurde.

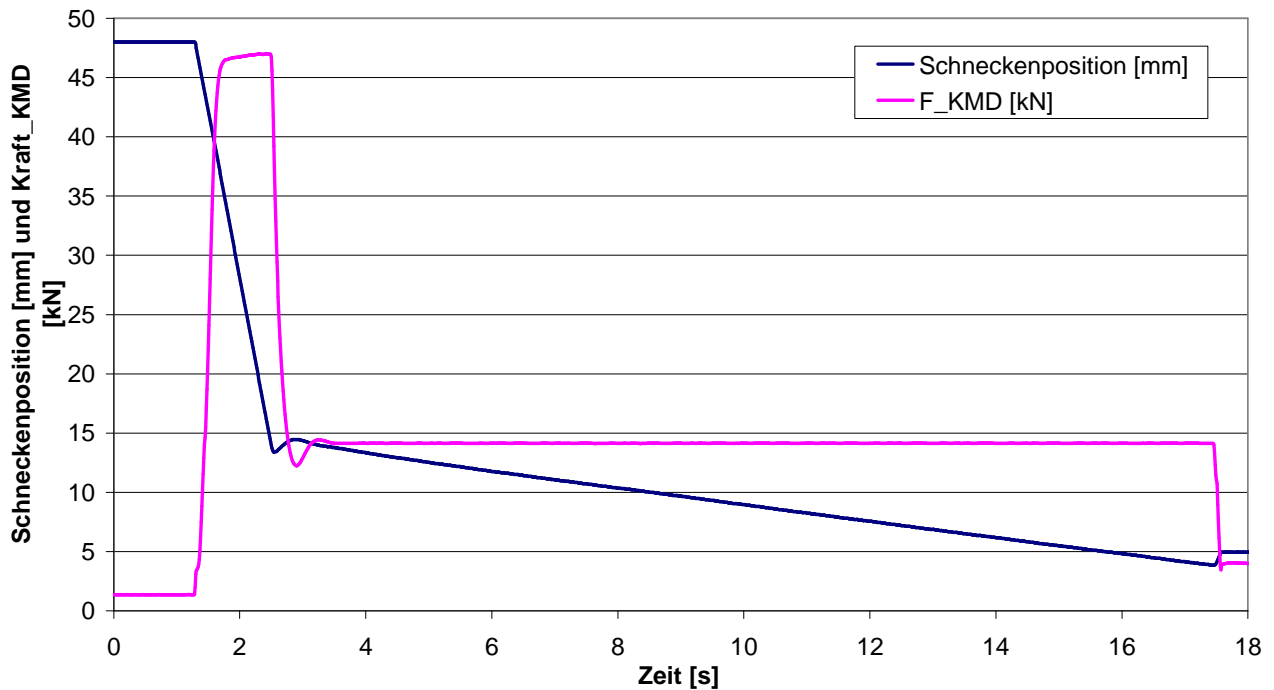
In Abbildung 4-3 sind die Schneckenpositionsverläufe und der Kraftverlauf (der Kraftmessdose am Schneckenschaft) eines Produktionszyklus jeweils für den Standard- und den Weg-Geschwindigkeitsgeregelten Prozess dargestellt. Bei den dargestellten Verläufen handelt es sich jeweils um Beispiele aus der ersten Versuchsreihe. Deutlich zu erkennen ist der unterschiedliche Charakter am Übergang von der Füll- in die Schwindungskompensationsphase. Während im Standardprozess die Schnecke kurzzeitig zurückläuft, um schnell das eingestellte Nachdruckniveau von 200 bar zu erreichen, wird im Weg-Geschwindigkeitsgeregelten Prozess die Vorschubgeschwindigkeit nur verringert. Der Schmelzedruck (Kraft) erreicht dadurch nur langsamer das eingestellte Niveau.

Anschließend sind für die Versuchsreihen 1 bis 3 die Verläufe der Variationskoeffizienten der Schneckenposition zu Beginn der Einspritzphase dargestellt. Für die Berechnung des Variationskoeffizienten wurden jeweils die Schneckenpositionsverläufe von 30 aufeinanderfolgenden Produktionszyklen mit der jeweiligen Betriebsart herangezogen. Der zeitliche Verlauf aller Schneckenpositionsverläufe wurde auf den Start der Schneckenbewegung

normiert. Dann werden für jeden Zeitschritt der Messung (mit 100 Hz) die Standardabweichung und der Variationskoeffizient berechnet und im Diagramm dargestellt.

Schneckenposition und Kraftverlauf KMD

(Standardprozess, Versuch 1)



Schneckenposition und Kraftverlauf KMD

(Weg-Geschwindigkeitsprofil, Versuch 1)

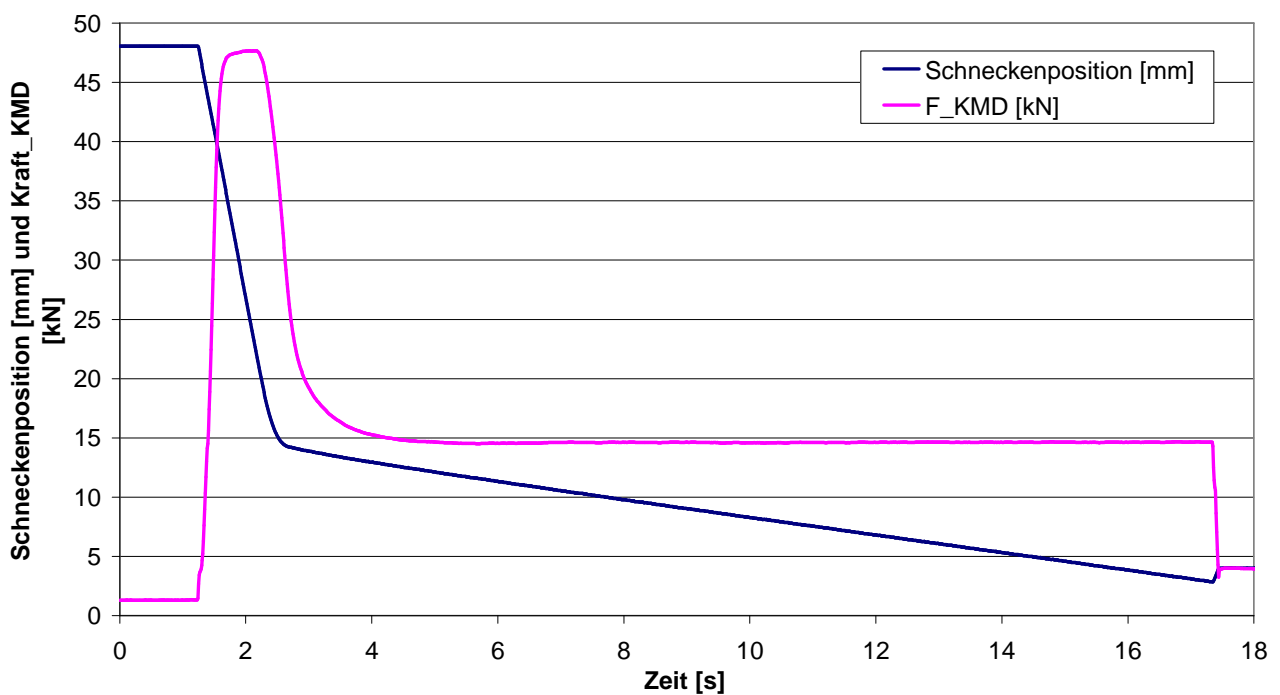


Abbildung 4-3: Schneckenposition und Kraftverlauf, Oben: Standardspritzgießprozess; Unten: Weg-Geschwindigkeitsprofil

Anhand des Verlaufes des Variationskoeffizienten des Standardprozesses ist deutlich der Umschaltunkt zu erkennen. In Abbildung 4-4 wird der Umschaltunkt beispielsweise 1,2 s nach Beginn des Einspritzvorgangs erreicht.

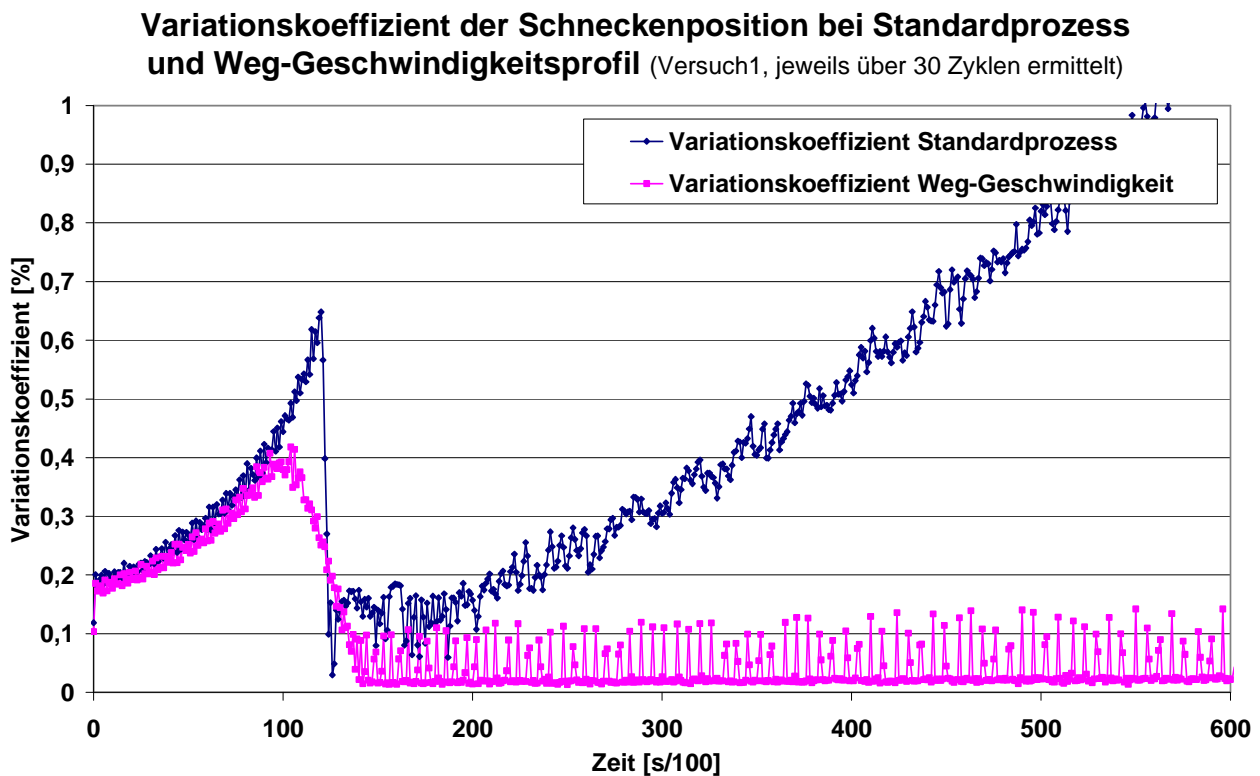


Abbildung 4-4: Variationskoeffizient der Schneckenposition bei Standardprozess und Weg-Geschwindigkeitsprofil (Versuch 1)

Der Umschaltunkt im Standardprozess wird bei der betrachteten Maschine sehr reproduzierbar erreicht, die Abweichungen an dieser Position liegen bei unter 0,1 % vom Absolutwert. Nach Passieren des Umschaltpunktes steigen die Variationskoeffizienten des Standardprozesses kontinuierlich an, was auf die druckgeführte Nachdruckphase zurückzuführen ist. Abweichungen im Schließverhalten der Rückströmsperre und Plastifizierschwankungen führen zu ungleichmäßigen Formfüllgraden am Umschaltunkt, was zu Abweichungen im Positionsverlauf der Nachdruckphase führt.

Der Verlauf des Variationskoeffizienten des Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Prozess ist grundlegend anders. Der Übergang in die Phase geringerer Geschwindigkeit erfolgt hier zeitlich gesehen bereits vor dem Umschaltunkt des Standardprozesses. Der Verlauf des Variationskoeffizienten fällt kontinuierlich ab und bleibt in der langsamen Phase bei ca. 0,02 % vom Absolutwert. Die zyklisch auftretenden Sprünge auf Werte von im Mittel um 0,1 % sind durch die Diskretisierung des Positionssignals zu erklären. Beim Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Prozess ist der Positionsverlauf der Schnecke nicht von eventuellen Abweichungen im Verhalten der Rückströmsperre oder des Plastifizieraggregates abhängig, so dass der erreichte Variationskoeffizient allein von der Reproduzierfähig-

keit der Einspritzachse abhängt. Die erreichten Reproduzierfähigkeiten bei niedrigen Geschwindigkeiten sind dabei höher.

Variationskoeffizient der Schneckenposition bei Standardprozess und Weg-Geschwindigkeitsprofil (Versuch2, jeweils über 30 Zyklen ermittelt)

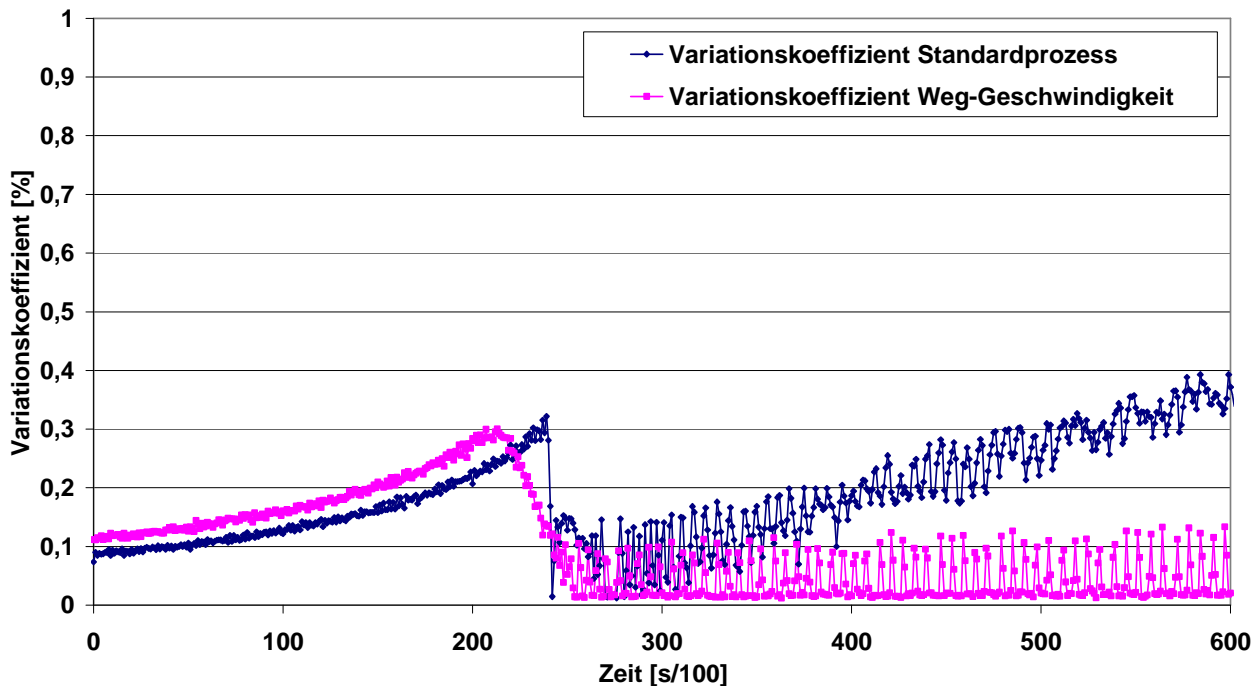


Abbildung 4-5: Variationskoeffizient der Schneckenposition bei Standardprozess und Weg-Geschwindigkeitsprofil (Versuch 2)

Der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Positioniergenauigkeit wird ebenfalls deutlich, betrachtet man die Versuchreihen 1 bis 3. Die Einspritzgeschwindigkeiten in den Versuchreihen betragen 20, 10 bzw. 5 ccm/s, dabei fällt der Maximalwert des Variationskoeffizienten im Standardprozess von 0,65 % in Versuch 1 über 0,31 % bis auf 0,18 % in Versuch 3 ab. Die Variationskoeffizienten im Weg-Geschwindigkeitsgeregelten Prozess liegen in den entsprechenden Versuchreihen bei 0,41 %, 0,30 % sowie 0,15 % und zeigen damit die gleiche Tendenz.

Die Reproduzierbarkeit der Umschaltposition ist im Standardspritzgießprozess eines der Hauptkriterien für eine hohe Maschinenfähigkeit. Da die gemessenen Abweichungen bei niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten geringer waren, könnte es sinnvoll sein, bereits vor Erreichen des eigentlichen Umschaltpunktes die Geschwindigkeit der Einspritzachse zu verringern, um dann mit höherer Positionspräzision in die druckgeregelte Phase umzuschalten.

Das weitere Verhalten der Variationskoeffizienten der beiden Prozessführungen ist grundsätzlich ähnlich. Die Unterschiede in der geschwindigkeitsgeregelten Formfüllphase liegen im Bereich von $\pm 0,01$ % und sind damit sehr gering.

Ferner sind die gemessenen Verläufe der Versuche mit höheren Drucksprüngen zwischen Einspritz- und Nachdruckphase ähnlich. Die Darstellungen der Versuchsreihen 4 bis 9 sind in Kapitel 9.4 zu finden.

Variationskoeffizient der Schneckenposition bei Standardprozess und Weg-Geschwindigkeitsprofil (Versuch3, jeweils über 30 Zyklen ermittelt)

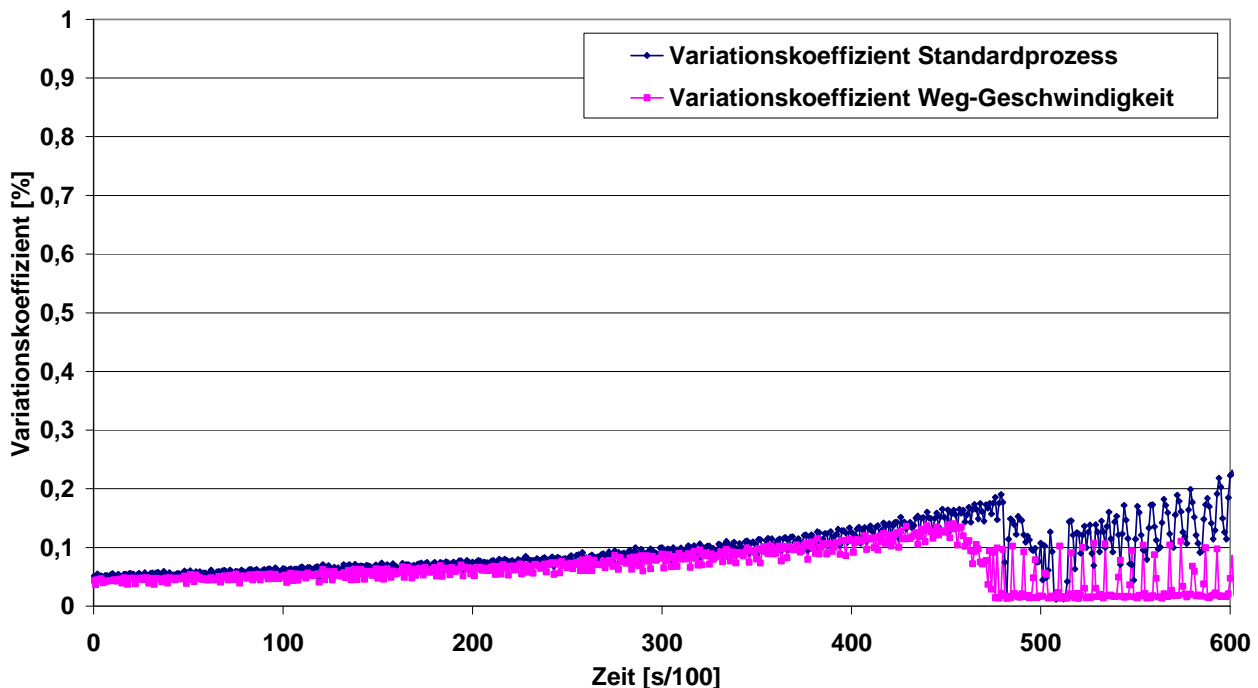


Abbildung 4-6: Variationskoeffizient der Schneckenposition bei Standardprozess und Weg-Geschwindigkeitsprofil (Versuch 3)

4.3 Prozesskonstanz mit Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Formfüllung

Zu Beginn wird die Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Prozessführung auf die erreichbare Prozesskonstanz untersucht. Zu diesem Zweck werden zwei verschiedene Materialien, ein PBT und ein HDPE (Materialdaten siehe Kapitel 9.1) verarbeitet und die über einen Zeitraum von mehreren hundert Produktionszyklen erreichten Gewichtsschwankungen der produzierten Formteile ermittelt. Innerhalb der Versuchsreihen bleibt die Maschineneinstellung jeweils unverändert. Um die Versuchsergebnisse nicht zu beeinflussen, werden die Umgebungsbedingungen möglichst konstant gehalten. Zu Dokumentations- und Überwachungszwecken werden sämtliche Prozess- und Überwachungsparameter prozesssynchron aufgezeichnet.

In Abbildung 4-7 sind die über die Versuchsdauer mit HPDE gemessenen Formteilm Gewichte dargestellt. Im Vergleich zu einem Standardspritzgießprozess sind die erreichten Gewichtsschwankungen hoch. Der Mittelwert der Formteilm Gewichte liegt bei 18,571 g, die Standardabweichung liegt bei 0,0184 g, womit sich der Variationskoeffizient zu einem Wert von 0,0990 % ergibt.

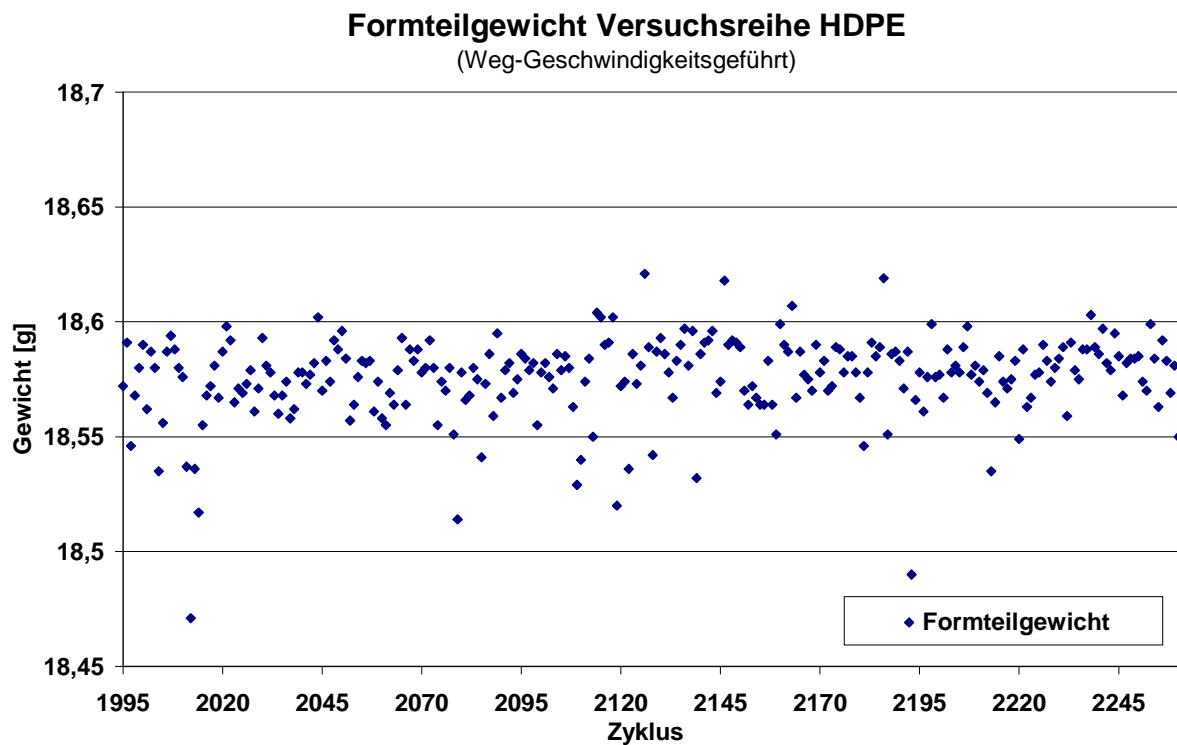


Abbildung 4-7: Formteilgewichte Versuchsreihe HDPE mit Weg-Geschwindigkeitsprofil

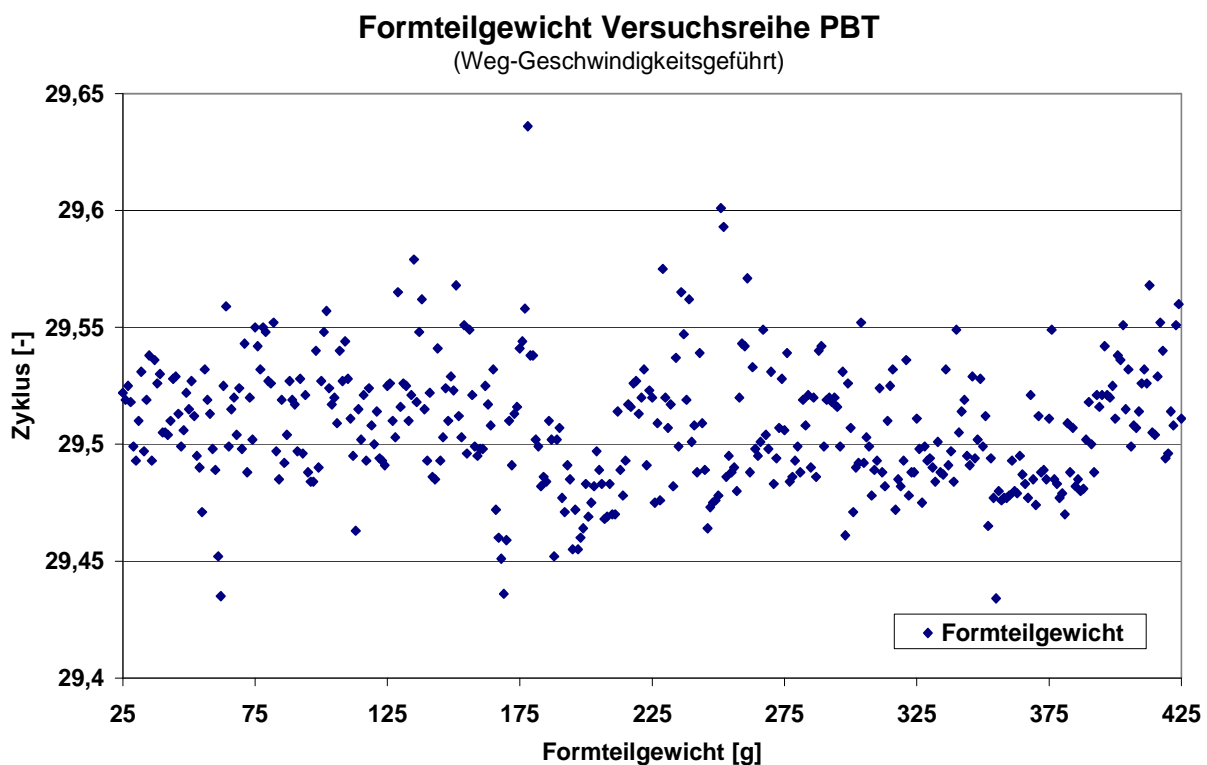


Abbildung 4-8: Formteilgewichte Versuchsreihe PBT mit Weg-Geschwindigkeitsprofil

Neben der generell hohen Streuung der Formteilmgewichte sind noch verschiedene Ausreißer zu erkennen, die den Streubereich deutlich verlassen.

In Abbildung 4-8 sind die in der Versuchsreihe mit PBT gemessenen Formteilmgewichte dargestellt. Auch hier sind im Vergleich zu einem Standardspritzgießprozess die erreichten Formteilmgewichtsschwankungen hoch. Der Gewichtsmittelwert liegt bei 29,505 g, die Standardabweichung liegt bei 0,0282 g, womit sich der Variationskoeffizient zu einem Wert von 0,0956 % ergibt. Ausreißer, wie sie im Versuch mit HDPE zu verzeichnen waren, wurden im Versuch mit PBT weniger häufig beobachtet.

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihen zeigen deutlich, dass ein einfaches Umstellen auf einen Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Prozess nicht zu einer Verbesserung der Prozesskonstanz führen kann. Durch Abweichungen in der Funktion von Bauelementen wie beim Schließverhalten der Rückströmsperre oder durch rohstoffinduzierte Prozessstörungen wird eine aktive Kompensation notwendig. Im Standardspritzgießprozess wird diese Kompensationsfunktion durch die druckgeführte Nachdruckphase realisiert. Ansätze zur aktiven Kompensation und damit der Steigerung der Prozessfähigkeit sind in Kapitel 4.5 dargestellt.

4.4 Verhalten von Weg-Geschwindigkeitsgeregelter- und Standardprozess beim Auftreten von rohstoffinduzierten Prozessstörungen

Der Weg-Geschwindigkeitsgeregelter und der Standardspritzgießprozess unterscheiden sich grundsätzlich in der Reaktion bei Eintritt einer rohstoffinduzierten Viskositätsstörung. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel das Verhalten der verschiedenen Betriebsweisen gegenübergestellt. Dabei wird die Prozessreaktion anhand der produzierten Formteilmgewichte dargestellt.

4.4.1 Standard- und Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Prozess (HDPE)

Zur Untersuchung des Verhaltens von Weg-Geschwindigkeitsgeregelter bzw. Standardspritzgießprozess werden Versuchsreihen durchgeführt, in denen gezielt eine Prozessstörung über den Rohstoff in die Maschine eingebracht wird. Im ersten Versuch mit HDPE wird ein Materialtyp in zwei unterschiedlichen Schmelzeviskositätsstufen verarbeitet. In der zweiten Versuchsreihe wird die Prozessstörung über ein PBT mit unterschiedlichen Restfeuchtigkeitsanteilen erzeugt. Die Maschineneinstellungen bleiben während des gesamten Versuchs unverändert. Ergebnis sind die Verläufe der erzielten Formteilmgewichte für die beiden Prozessfahrweisen, die nachfolgend dargestellt werden.

In Abbildung 4-9 sind die Ergebnisse der Versuchsreihe mit HDPE abgebildet. Begonnen wurde in diesem Fall mit dem Standardspritzgießprozess im Zyklus 1398, verarbeitet wurde dabei ein HDPE mit einem MFI von 19 [g/10min]. Im Zyklus 1417 wurde dann auf ein HDPE mit einem MFI von 30 [g/10min] gewechselt.

Nach ca. 14 Produktionszyklen ist erstmals eine Steigerung des Formteilgewichtes zu erkennen. Im weiteren Verlauf steigt das Formteilgewicht von einem anfänglichen Mittelwert von 18,493 g um 0,034 g auf 18,527 g nach einer Übergangsphase an. Die Standardabweichung des Formteilgewichtes erreicht einen Wert von 0,0034 g.

Anschließend wurde wieder auf den ersten Materialtyp gewechselt und die Versuchsreihe mit Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Prozessführung wiederholt. Hierbei wurde im Zyklus 1526 auf den niedrigviskoser Materialtyp gewechselt. Bereits nach fünf Produktionszyklen ist ein erster Anstieg des Formteilgewichtes zu erkennen.

Vergleich der Formteilgewichte bei einer Materialstörung

(Wechsel von HDPE MFI 19 auf MFI 30)

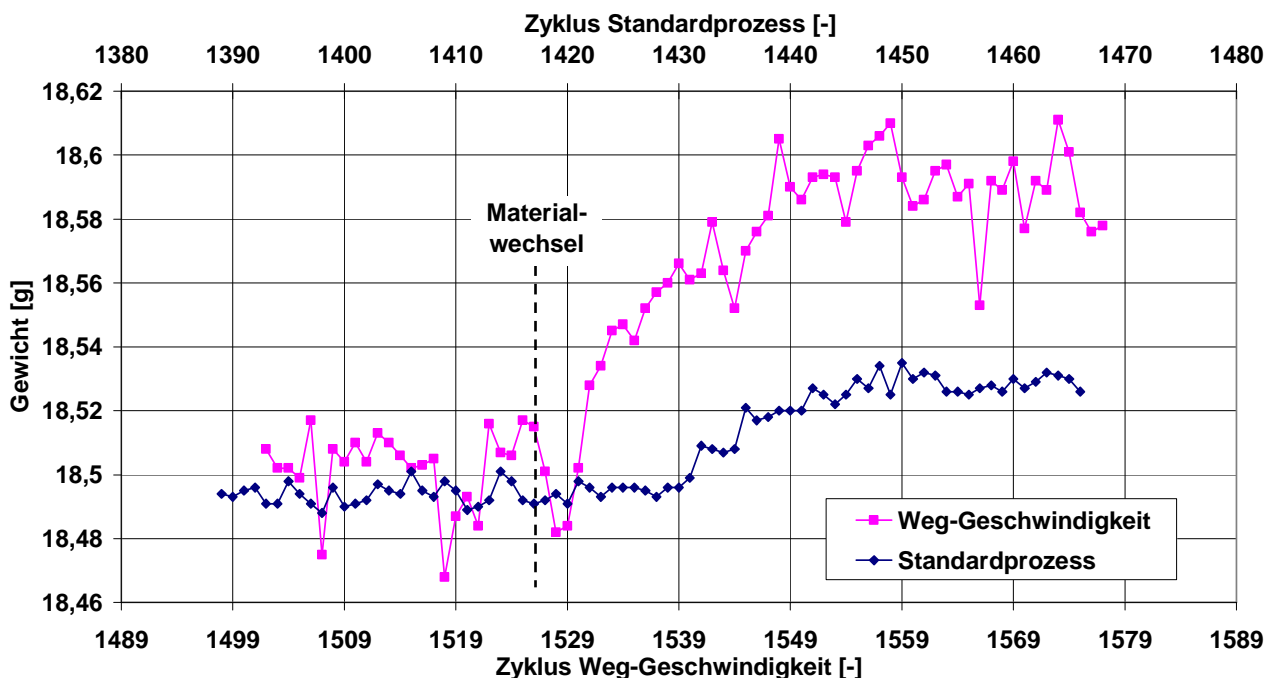


Abbildung 4-9: Vergleich der Formteilgewichte bei Wirken einer Materialstörung (HDPE)

Das Formteilgewicht steigt in dieser Versuchsreihe von einem anfänglichen Mittelwert von 18,501 g um 0,088 g auf 18,589 g nach einer Übergangsphase an. Die Standardabweichung des Formteilgewichtes bei Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Formteilbildung erreicht einen Wert von 0,0124 g.

Vergleicht man die sich ergebenden Verläufe der Formteilgewichte, stellt man fest, dass bei der Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Prozessweise eine höhere absolute Gewichtsänderung als bei dem Standardprozess zu verzeichnen ist. Die Gewichtsabweichung durch die Viskositätsänderung liegt um den Faktor 2,5 über der des Standardprozesses. Die Viskositätssenkung führt bei beiden Prozessen zu einem früheren Schließen der Rückströmsperre, wodurch am Umschaltzeitpunkt bzw. dem Übergang in die langsame Prozessphase bereits mehr Schmelze in die Kavität eingebracht ist. Im Standardprozess wird

dieser Vorgang durch die Verläufe von Restmassepolster und maximalem Werkzeuginnendruck bestätigt. Wie in Abbildung 4-10 zu sehen ist, steigen die beiden Parameter nach dem Materialwechsel an, was die Erklärung der Vorgänge in der Einspritzeinheit bestätigt. Im Standardprozess wird der Gewichtsanstieg zuerst durch die kompensierende Wirkung der Nachdruckphase wieder ausgeglichen.

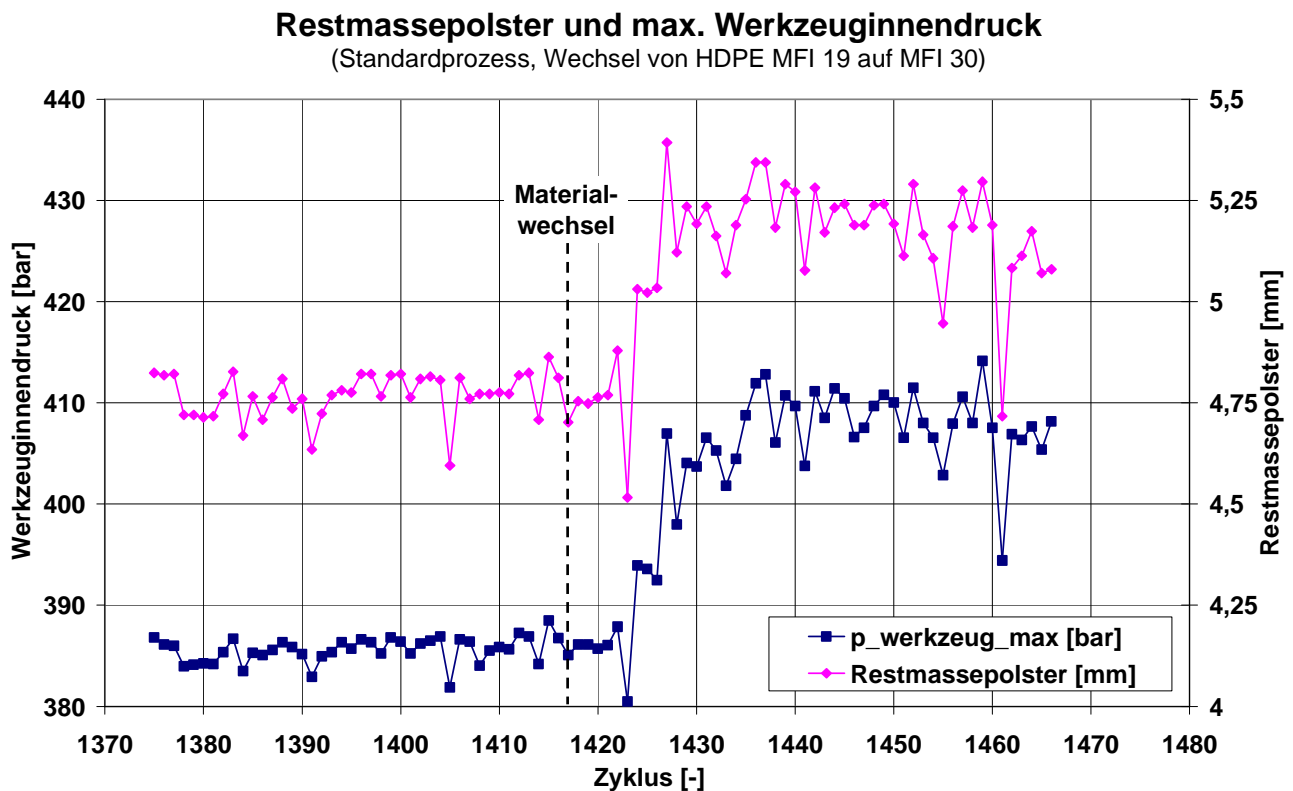


Abbildung 4-10: Restmassepolster und max. Werkzeuginnendruck beim Standardprozess (Werte zum Versuch aus Abbildung 4-9)

Im Weg-Geschwindigkeitsgeregelten Prozess findet keine derartige (passive) Kompensation statt, weshalb die Gewichtszunahme hier höher ausfällt.

Der schnellere Anstieg des Formteilmgewichtes im Weg-Geschwindigkeitsgeregelten Prozess ist auf den gleichen Effekt zurückzuführen. Beim Standardprozess kann die Rohstoffänderung in der Übergangsphase zuerst noch über die Nachdruckwirkung ausgeglichen werden, so dass die Formteilmgewichte hier erst später steigen.

4.4.2 Standard- und Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Prozess (PBT)

In einer zweiten Versuchsreihe wurde ein PBT verarbeitet. Die Prozessstörung wurde durch ein Granulat mit unterschiedlichen Restfeuchtigkeitsgehalten in den Prozess eingebracht. Begonnen wurde die Versuchsreihe mit einem Restfeuchtigkeitsgehalt von 0,041 %, um dann in den Zyklen 2530 bzw. 2710 auf ein Granulat mit 0,125 % Restfeuchtigkeit zu wechseln. Beim Standardspritzgießprozess stellt sich mit PBT ein mittleres

Formteilmgewicht von 29,524 g ein. Nach dem Wechsel auf das Granulat mit geringerer Restfeuchtigkeit fällt das Formteilmgewicht bei ansonsten konstanten Maschineneinstellungen um 0,033 g auf 29,491 g. Die steigende Viskosität der Schmelze führt zu einem verlangsamt Schließen der Rückströmsperre und damit zu einer verringerten Kompression am Umschaltpunkt. Dieser Unterschied kann in der Nachdruckphase nicht mehr vollständig ausgeglichen werden. Der Einfluss der gesteigerten Viskosität auf die internen Fließwiderstände scheint hierbei gering zu sein. Die Standardabweichung des Formteilmgewichtes erreicht vor dem Übergangsbereich einen Wert von 0,0089 g.

Die mittleren Formteilmgewichte bei Weg-Geschwindigkeits geregelter Formfüllung liegen zu Beginn bei 29,537 g, fallen nach dem Wechsel auf trockeneres Granulat kurzzeitig auf Werte von 29,400 g und steigen dann wieder kontinuierlich an. Bei Formteilmgewichten von ca. 29,540 g stellt sich wiederum ein konstanter Gewichtsbereich ein. Vor dem Materialwechsel erreicht die Standardabweichung des Formteilmgewichtes dabei Werte von 0,0344 g, nach dem Materialwechsel sind die Gewichtsschwankungen mit 0,0153 g deutlich geringer. Die Viskositätsänderung bewirkt einen Übergang zu einem Betriebspunkt mit geringeren Prozessschwankungen.

Vergleich der Formteilmgewichte bei einer Materialstörung

(PBT, Restfeuchtigkeitswechsel von 0,125% auf 0,041% H₂O)

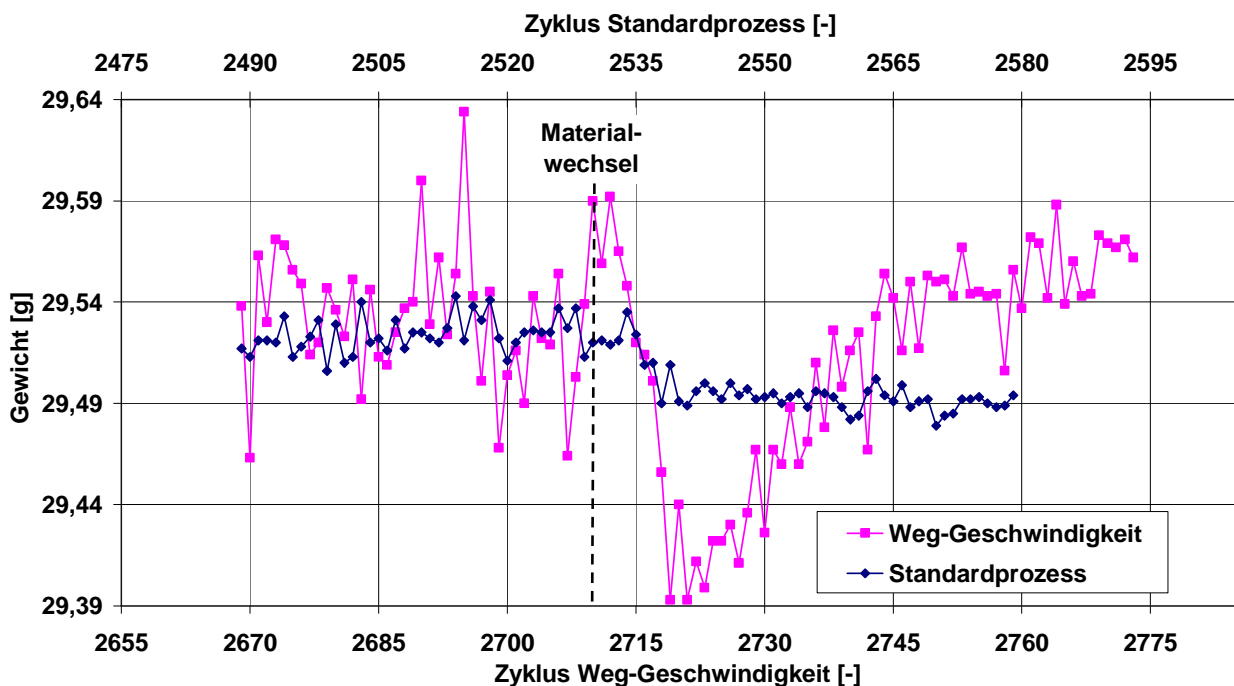


Abbildung 4-11: Vergleich der Formteilmgewichte bei Wirken einer Materialstörung

Ein Anstieg des Formteilmgewichtes aufgrund einer zunehmenden Restfeuchtigkeit des Granulates kann ausgeschlossen werden. In Abbildung 4-12 sind die Einspritzarbeiten der Versuchsreihe dargestellt. Die Einspritzarbeit entspricht der Arbeit, die in der Einspritzein-

heit aufgewendet wird, um die Schmelze in die Kavität zu fördern und korreliert deutlich mit der Schmelzeviskosität. Grundlage der hier dargestellten Werte ist der Kraftmesswert an der Kraftmessdose am Schneckenschaft. Die Werte der Einspritzarbeit des Weg-Geschwindigkeitsgeregelten Prozesses liegen im Mittel um ca. 10 Ws über denen des Standardprozesses, da hier aus messtechnischen Gründen der gesamte Schneckenhub (Formfüll- und Schwindungsausgleich) als Einspritzvorgang gewertet wird. Beim Standardprozess beschränkt sich die Berechnung der Einspritzarbeit dagegen ausschließlich auf die Formfüllphase bis zum Umschaltunkt.

Vergleich der Einspritzarbeiten bei einer Materialstörung

(Weg-Geschw., PBT, Restfeuchtigkeitswechsel von 0,125% auf 0,041% H₂O)

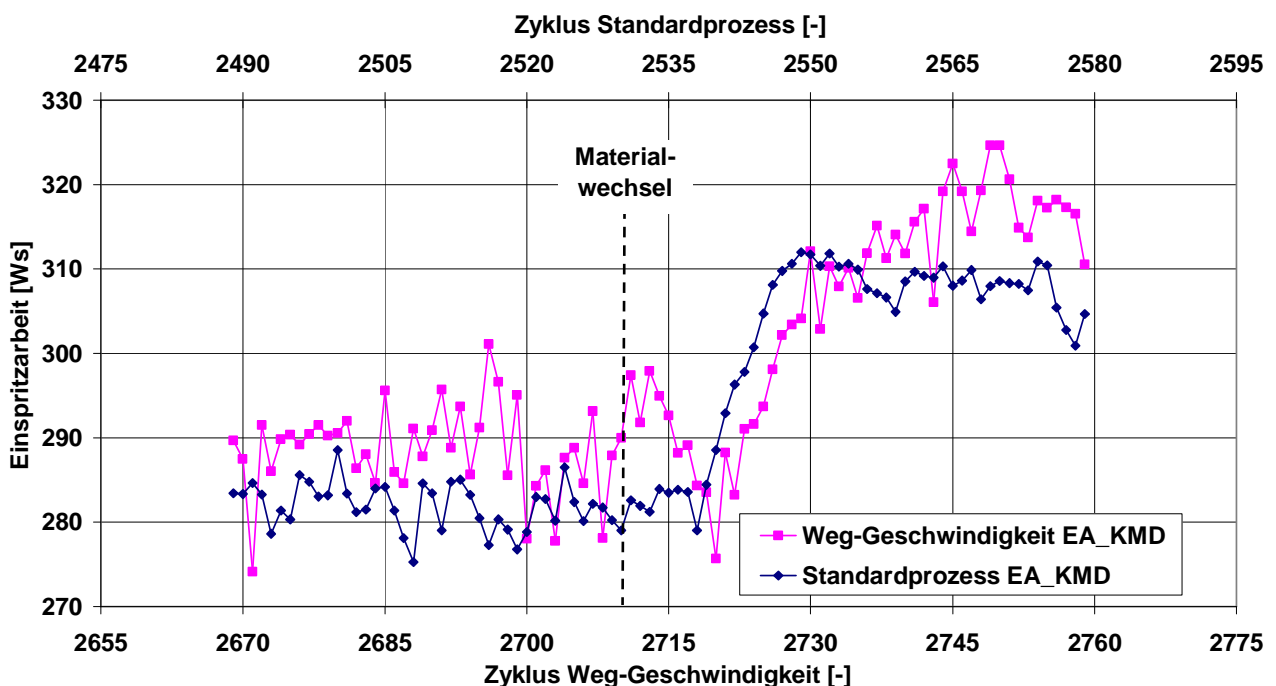


Abbildung 4-12: Vergleich der Einspritzarbeiten bei Wirken einer Materialstörung (PBT, Restfeuchtigkeitswechsel)

Die Werte der Einspritzarbeiten steigen nach dem Wechsel des Materials um 9,2 % beim Standardprozess bzw. 10,3 % bei dem Weg-Geschwindigkeitsgeregelten Prozess. Daraus lässt sich ableiten, dass die durch die Restfeuchtigkeitschwankung verursachte Viskositätsänderung auf einem Niveau liegt. Im Besonderen kann ausgeschlossen werden, dass eine Erniedrigung der Schmelzeviskosität für den Anstieg des Formteilgewichtes verantwortlich ist.

Der Effekt kurzzeitig sinkender Formteilgewichte bei Wirken einer rohstoffgetragenen Viskositätsstörung wurde bei mehreren Versuchsreihen mit Weg-Geschwindigkeitsgeregeltem Prozess beobachtet. Die Dauer des Effektes ist von der Störung selber sowie dem Verweilzeitverhalten der Schmelze im Zylinder abhängig. So ist der Übergangsbe-

reich bei einem Wechsel von einem niedrig- zu einem hochviskosen Material schneller vollzogen, weil der Spülprozess des Systems schneller abgeschlossen ist.

In dieser Übergangsphase, in der sich der Prozess auf einen neuen Betriebspunkt umstellt, wirken verschiedene Effekte auf das Formteilgewicht. Der beherrschende Effekt, der das Formteilgewicht beeinflusst, ist das Schließverhalten der verwendeten Ringrückströmsperre. Die Rückströmsperrenfunktion ist stark von der Schmelzeviskosität des verarbeiteten Polymers abhängig. Bei steigenden Viskositäten schließt der Sperring verzögert, was bei einem konstanten Weg-Geschwindigkeitsprofil zu einer Verringerung der Formteilgewichte führt.

Daraus abgeleitet kommt es bei dem in Abbildung 4-11 gezeigten Versuch nach dem Materialwechsel zunächst zu einer Viskositätssteigerung. Unterstützt wird diese Annahme durch eine kurzzeitig um bis zu 0,2 K verringerte Zylindertemperatur an der düsenseitig letzten Temperaturmessstelle. In Abbildung 4-13 sind die Parameter „Temperatur Düse“ und „Heizenergie Düse“ dargestellt, zur Verdeutlichung der Verläufe ist jeweils ein gleitender Durchschnitt über zehn Zyklen eingefügt.

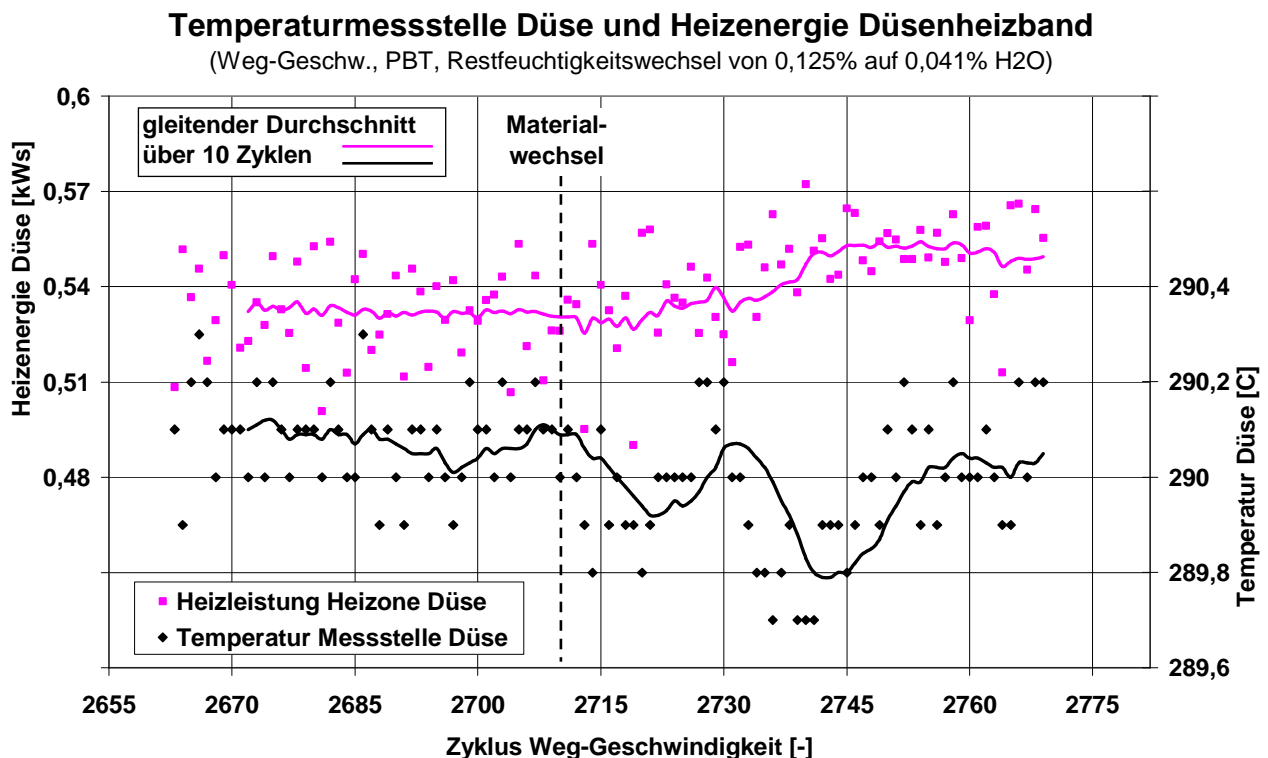


Abbildung 4-13: Temperaturmessstelle Düse und Heizenergie Düsenheizband (PBT, Weg-Geschwindigkeitsgeregelt)

Die Temperaturen werden als Mittelwert über den Gesamtzyklus ermittelt und an den serienmäßigen Temperaturmessstellen des Einspritzzylinders gemessen, weshalb die Messwerte einer erheblichen Dämpfung unterliegen. Die Heizenergie errechnet sich wie in Ka-

pitel 3.2.1 dargestellt aus der Leistungsaufnahme des Heizelementes und der jeweiligen Einschaltdauer im Zyklus.

Etwa sieben Produktionszyklen nach dem Wechsel auf den trockeneren Rohstoff fällt der Mittelwert der Temperaturwerte erstmals unter 290 °C, um nach einem kurzen Anstieg erneut auf 289,6 °C zu sinken. Der Verlauf der eingebrachten Heizenergie verhält sich entsprechend. In Bereichen, in denen die Temperaturwerte sinken, steigt die über die Heizung eingebrachte Energiemenge an. Vom Materialwechsel in Zyklus 2710 bis zum Zyklus 2745, ab dem die Übergangsphase vollzogen ist und sich ein konstantes Formteilgewicht eingestellt hat, steigt die durch das Heizband eingebrachte Energie um ca. 4,5 % gegenüber dem Anfangszustand. Dabei erreichen die Temperaturwerte das Anfangsniveau von 290,05 °C. An den übrigen Zylinderzonen sind keine Temperaturschwankungen messbar, die mit dem Restfeuchtigkeitswechsel zusammenhängen.

Das Erreichen des anfänglichen Temperaturniveaus korreliert mit dem Anstieg der Formteilgewichte. Der Prozess hat sich an die neuen Rohstoffeigenschaften angepasst und stabilisiert, wobei die Formteilgewichte im Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Prozess leicht über dem Anfangsniveau liegen.

In der Versuchsreihe mit der Standardprozessführung wurde ein entsprechender Anstieg der eingebrachten Heizenergien beobachtet, eine entsprechende Temperaturabweichung wurde nicht beobachtet bzw. war nicht messbar.

4.5 Steigerung der Prozesskonstanz bei Weg-Geschwindigkeitsgeregelterm Einspritzhub durch eine aktive Anpassung des Einspritzprofils

Den vorangegangenen Kapiteln ist zu entnehmen, dass ein einfacher Wechsel auf eine Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Formteilkonstruktion ohne eine Verringerung der Prozesskonstanz und damit der Bauteilqualität nicht möglich ist. Ohne weitere Maßnahmen sind keine robusteren Spritzgießprozesse als mit der Standardprozessführung zu realisieren. Denkbar ist jedoch die Verwendung der in der Maschine vorhandenen Informationen, um auf deren Basis eine aktive Korrektur des Weg-Geschwindigkeitsprofils zu berechnen.

Eine der größten Störgrößen im Standardspritzgießprozess ist das Schließverhalten der Rückströmsperre. Zum einen ist das Schließverhalten stark von der Viskosität des verarbeiteten Polymers abhängig, zum anderen führen die (heute) gewöhnlichen Streuungen im Schließverhalten bereits zu unzulässig hohen Abweichungen im Formteil, sofern sie nicht durch eine druckgeführte Phase kompensiert werden.

In Abbildung 4-14 ist ein typischer Schneckenpositionsverlauf bei Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Betriebsweise als durchgezogene Linie dargestellt. Nach einer Formfüllphase mit hier konstanter Vorschubgeschwindigkeit wird die Achse abgebremst und eine Phase langsamer Geschwindigkeit schließt sich an. Eine Möglichkeit, korrigierend auf den Prozess einzugreifen, besteht darin, den Übergang in die Phase langsamer Geschwindigkeit zu verschieben, wie es durch die gestrichelten Linien angedeutet ist. Durch diese Pa-

parallelverschiebung des Profils bleibt die Formfüllcharakteristik erhalten, es kann jedoch auf ein verändertes Schließverhalten der Rückströmsperre reagiert werden.

Anpassen des Weg-Geschwindigkeitsprofils zum Ausgleich von Prozessschwankungen

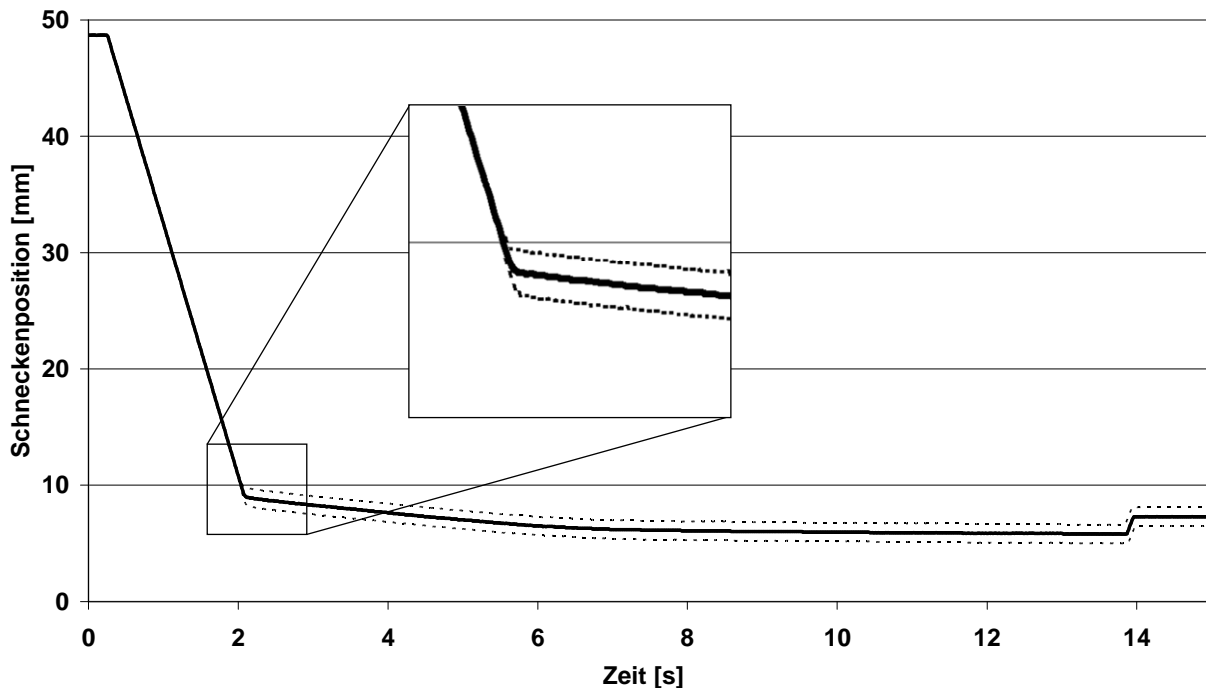


Abbildung 4-14: Anpassen des Weg-Geschwindigkeitsprofil zum Ausgleich von Prozessstörungen

Dieses Verschieben der Position des Geschwindigkeitsübergangs entspricht einem aktiven Verschieben des Umschaltpunktes im Standardprozess. Ist es z.B. möglich den exakten Schließzeitpunkt der Rückströmsperre über die Maschinensensorik zu ermitteln, so können die vorhandenen Unterschiede im Schließverhalten online über eine Verschiebung des Einspritzprofils korrigiert werden.

In einer ersten Versuchsreihe wurde die Möglichkeit einer Gewichtskorrektur durch das Verschieben des Einspritzprofils, wie es in Abbildung 4-14 dargestellt ist, untersucht. Vor Beginn der Versuchsreihe wurde der Zusammenhang zwischen Profilverschiebung und Formteilgewicht am eingestellten Betriebspunkt ermittelt. Eine Darstellung des ermittelten Zusammenhangs findet sich im Anhang 9.3. Zur Erzeugung einer gezielten Prozessstörung wurden in der Versuchsreihe zwei HDPE-Typen mit abweichenden Schmelzeviskositäten sowie Mischungen daraus verarbeitet. Zielgröße dieser Versuchsreihe war das in Abbildung 4-15 dargestellte Formteilgewicht.

Zu Beginn werden 100 % des ersten Materialtyps verarbeitet, wobei sich ein Formteilgewicht von im Mittel 18,507 g einstellt. Nach dem Wechsel auf eine 70/30 % Materialmischung steigt das Formteilgewicht bei unveränderten Maschineneinstellungen auf einen Mittelwert von 18,562 g. Ursache ist die verringerte Schmelzeviskosität der Materialmi-

schung, die ein schnelleres Schließen der Rückströmsperre bewirkt und damit die eine Gewichtszunahme um 0,055 g bedingt.

Um das Formteilmgewicht wieder auf den Ausgangswert zurückzubringen, wird eine Korrektur des Einspritzprofils von +0,24 ccm vorgenommen. Durch die positive Verschiebung des Profils erfolgt der Übergang in die langsame Prozessphase früher als zuvor. Da die internen Fließwiderstände nur einen geringen Einfluss auf das Formteilmgewicht haben, entspricht das Korrekturvolumen in guter Näherung dem durch das Schließverhalten der Rückströmsperre verursachten Volumendefekt.

Formteilmgewicht bei einer Viskositätsstörung und Einspritzprofilanpassung (Material HDPE Mischungen)

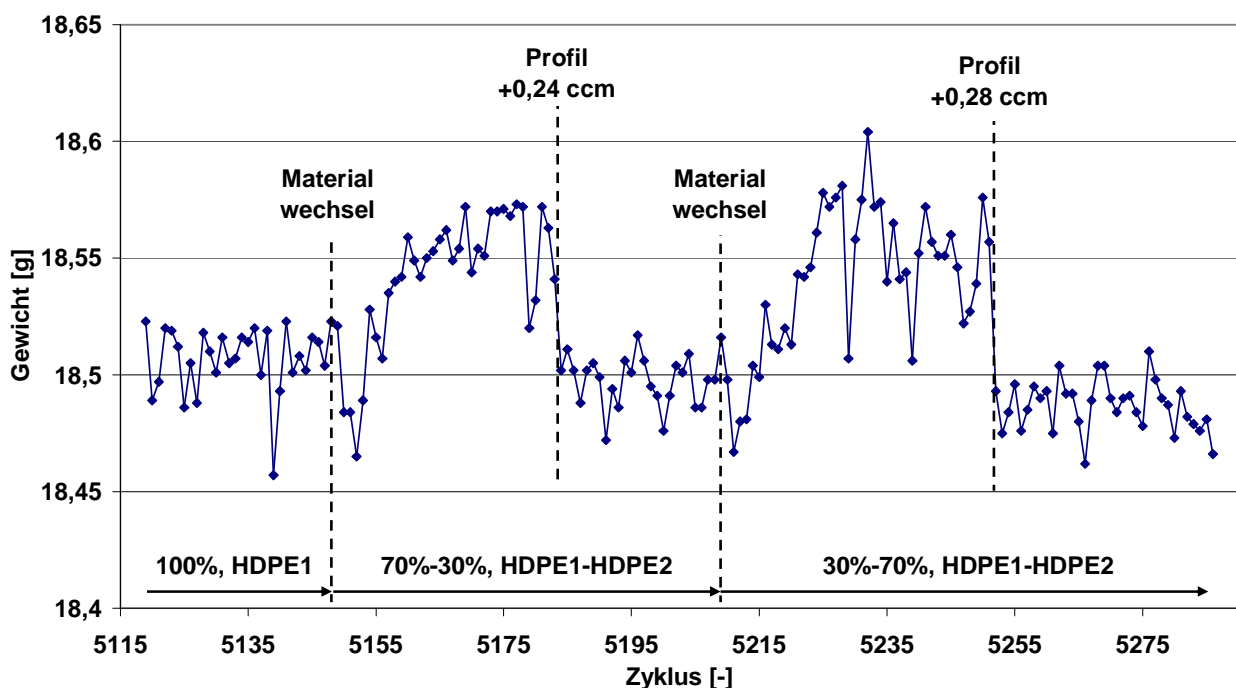


Abbildung 4-15: Formteilmgewicht bei einem Materialwechsel und Einspritzprofilanpassung (Material HDPE-Mischungen mit MFI von 19 bis 28)

Durch die Verschiebung des Einspritzprofils sinkt das Formteilmgewicht auf einen Mittelwert von 18,501 g. In Zyklus 5209 wird dann auf eine 30/70 % Materialmischung gewechselt, was nochmals eine Verringerung der Schmelzeviskosität zur Folge hat. Dadurch steigt das Formteilmgewicht erneut um 0,056 g an, wobei jetzt auch die Streuung der Formteilmgewichte deutlich zunimmt. Eine erneute Korrektur des Einspritzprofils um +0,28 ccm bewirkt einen Gewichtsrückgang annähernd auf das Ursprungsniveau.

Zusammenfassend kann man sagen, dass eine Korrektur der Formteilqualität durch ein aktives Verschieben des Einspritzprofils möglich ist. Die in der Versuchsreihe angewendete manuelle Korrektur über die gemessenen Formteilmgewichte und die anschließende Korrektur auf Basis eines Vorversuches ist dagegen in der Praxis nicht einsetzbar. Soll der

Einspritzhub einer Spritzgießmaschine über ein Weg-Geschwindigkeitsprofil realisiert werden, muss eine automatische Anpassung des Einspritzprofils erfolgen. Nur so können die im Vergleich zum Standardspritzgießprozess höheren Formteilmgewichtsschwankungen ausgeglichen werden. Die Vorgabe für eine Korrektur des Einspritzprofils sollte aus Sicht des Autors über die Kombination aus zwei Ansätzen erfolgen.

- Sensorisches Erkennen des Schließzeitpunktes der Rückströmsperre
- Prognosemodellbasiertes Anpassen des Einspritzprofils in der Schwindungsausgleichsphase

Auf diese Weise wäre es möglich die kurzzeitigen (in jedem Zyklus) Streuungen, die durch ein nicht-reproduzierbares Schließen der Rückströmsperre verursacht werden, durch ein Verschieben des Einspritzprofils auszugleichen. Um weiterhin Qualitätsabweichungen der Formteile, die durch die Fließeigenschaften der Schmelze beeinflusst werden, korrigieren zu können, ist eine Adaption des Bewegungsprofils der Schwindungsausgleichsphase notwendig. Diese Adaption könnte auf der Basis von Prognosemodellen der produzierten Formteilqualität erfolgen. Im Folgenden werden die Ergebnisse zu den beiden Ansätzen dargestellt und bewertet.

4.5.1 Sensorisches Erkennen des Schließzeitpunktes der Rückströmsperre

Schließt bei einem Weg-Geschwindigkeitsgeregelten Prozess die Rückströmsperre im Bereich von Millisekunden schneller/langsamer, steigt/fällt der Druck in der Schwindungsausgleichsphase stark an/ab. Dabei können, je nach Baugröße der Einspritzeinheit und Formteilgeometrie, bereits Unterschiede von wenigen Kubikmillimetern zu hohen Druckunterschieden führen.

In Abbildung 4-16 sind vier Verläufe der Kraftmessung am Schneckenschaft bei Weg-Geschwindigkeitsgeregeltem Einspritzhub einer Standard-Einspritzeinheit dargestellt. Der Ausschnitt zeigt den Beginn der Schneckenbewegung, die Formfüllphase sowie den Übergang in die Schwindungsausgleichphase. Da die Schneckenpositionsverläufe deckungsgleich sind (allg. Abweichungen der Positionsregelung siehe Kapitel 4.2), wird ein repräsentativer Schneckenpositionsverlauf dargestellt.

Begonnen wurde die Versuchsreihe mit einem HDPE mit einem MFI von 19, von dem im weiteren Verlauf auf einen anderen HDPE-Typ mit einem MFI von 30 gewechselt wurde. Die vier dargestellten Kraft/Druckverläufe wurden vor dem Wechsel, während des Spülprozesses und nach vollzogenem Materialwechsel aufgezeichnet. Die gezeigten Druckverläufe veranschaulichen dabei die in mehreren Versuchsreihen erzielten Erkenntnisse auf charakteristische Weise.

Kraftverläufe der Formfüllphase bei Weg-Geschwindigkeits-geregeltem Prozess und Materialwechsel (HDPE MFI 19 auf 30)

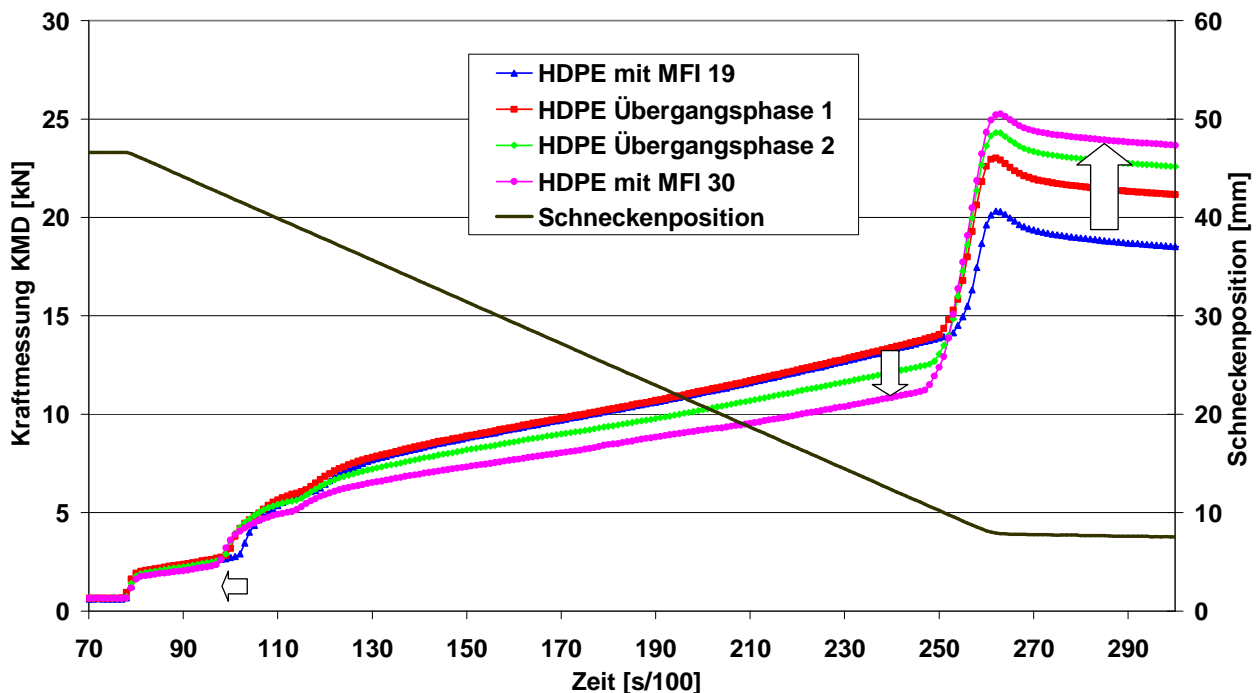


Abbildung 4-16: Druckverlauf und Schneckenposition zu Beginn der Einspritzphase bis in die Schwindungsausgleichphase (Material HDPE mit MFI von 19 bis 30)

Der Druckverlauf des „HDPE mit MFI 19“ stellt hier den Ausgangszustand dar, von dem aus auf das niedrigviskosere HDPE gewechselt wurde. Zu erkennen ist ein kontinuierlicher Druckanstieg von Beginn der Schneckenbewegung an. In diesem Bereich wird der eingestellte Dekompressionshub von 7,08 mm zurückgelegt und der Druck im Schneckenraum steigt stetig an. Bei einem Zeitwert von ca. 1 s nach Beginn der Messung erfolgt ein steiler Druckanstieg. Die Position dieses Druckanstiegs korreliert mit dem Schließen der Rückströmsperre und erfolgt beim Verlauf „HDPE mit MFI 19“ später als bei den anderen dargestellten Verläufen. Der Druckanstieg im Übergang in die Schwindungsausgleichphase erfolgt ebenfalls verzögert, das Kraftmaximum der Kompressionsphase liegt bei 20,32 kN. Der bei einem Zeitwert von 1,15 s auftretende zweite Druckanstieg ist auf die Formteilgeometrie zurückzuführen. Wie in einer Füllstudie nachgewiesen werden konnte, basiert dieser Druckanstieg auf einer Umlenkung aus dem (Kaltkanal-) Stangenanguss in den Vorverteiler für den Bandanguss. Die Ergebnisse der durchgeführten Füllstudie finden sich im Anhang 9.2.

Der Druckverlauf „HDPE Übergangsphase 1“ wurde wenige Produktionszyklen nach dem Entleeren des Materialtrichter und dem Wiederbefüllen des HDPE mit MFI 30 aufgezeichnet. Der Druckanstieg bei einem Zeitwert von 1 s erfolgt bei diesem Zyklus erkennbar früher. Der Druckverlauf am Übergang in die Schwindungsausgleichphase steigt ebenfalls früher an und erreicht jetzt ein Kraftmaximum von 23,02 kN. In der Formfüllphase ist der Kurvenverlauf nahezu deckungsgleich mit dem ersten Kraftverlauf.

Der im weiteren Verlauf des Versuchs aufgezeichnete Kraftverlauf „HDPE Übergangsphase 2“ zeigt bei einem Zeitwert von 1 s einen nochmals früheren Druckanstieg, der allerdings in der dargestellten Skalierung optisch nicht zu erkennen ist. In der Formfüllphase nimmt der für die Schneckenbewegung notwendige Kraftbedarf ab. Das Kraftmaximum in der Kompressionsphase erreicht in diesem Zyklus 24,29 kN.

Bei dem vierten der dargestellten Kraftverläufe „HDPE mit MFI 30“ sinkt der Kraftbedarf in der Formfüllphase weiter ab und das Kraftmaximum am Übergang in die Schwindungsausgleichsphase erreicht einen Wert von 25,26 kN. Der Materialwechsel ist zu diesem Zeitpunkt vollständig vollzogen.

Dieses charakteristische Verhalten bei einer Variation der Schmelzeviskosität ist durch die Vorgänge in der Einspritzeinheit im Verlauf des sich vollziehenden Materialwechsels zu erklären. Nachdem in der Versuchsreihe das Material gewechselt wurde, wird als erstes der Hauptmassenstrom entlang des Schnecke durch das neue Material gespült. Dies hat zur Folge, dass bereits wenige Produktionszyklen nach dem Materialwechsel die Rückströmsperre, bedingt durch die sinkende Viskosität der Schmelze, schneller schließt und der Druckanstieg (bei Zeitwert 1 s in Abbildung 4-16) früher erfolgt. Dadurch verbleibt mehr Schmelze im Schneckenraum und das Druckniveau in der Schwindungsausgleichsphase steigt an. Der Kraftbedarf in der Formfüllphase ist dabei zu diesem Zeitpunkt noch unverändert.

In dieser Prozessphase mit höheren Relativgeschwindigkeiten sind die Reibungseffekte in den Randschichten von Schnecke und Zylinder entscheidend für den Kraftbedarf. Da diese Randschichten im Vergleich zum Hauptmassenstrom nur langsam ausgespült werden, sinkt der Kraftbedarf in der Formfüllphase nur langsam ab. Die beiden Effekte „Rückströmsperren Schließverhalten“ und „Kraftbedarf in der Formfüllphase“ treten zeitversetzt auf. Der zeitliche Versatz ist dabei von der Verweilzeitcharakteristik der Einspritzeinheit sowie den Spüleigenschaften des Polymers abhängig.

Der Zeitpunkt des Druckanstieges am Beginn der Einspritzphase lässt sich reproduzierbar und exakt erfassen, so dass er für eine Regelung des Einspritzprozesses verwendet werden kann. Über eine sensorische Erfassung des Schließzeitpunktes der Rückströmsperre können auch sehr temporär wirkende Viskositätsschwankungen, die sich aufgrund von nicht vollständig vollzogenen Spülprozessen nicht auf den Druckbedarf in der Formfüllphase auswirken, nachgewiesen werden. Solche kurzzeitigen Viskositätsdefekte entstehen z.B. durch einen kurzzeitig erhöhten Regranulatanteil im System.

Abbildung 4-17 zeigt zwei Kraftverläufe aus der zuvor beschriebenen Versuchsreihe sowie die repräsentative Schneckenposition des eingestellten Weg-Geschwindigkeitsprofils. Deutlich zu erkennen ist der markierte zeitliche Versatz des Druckanstieges von 0,05 s, der aus dem unterschiedlichen Schließverhalten der Rückströmsperre bei einem MFI von 19 bzw. 30 resultiert. Der zweite leichte Druckanstieg (bei Zeitwert 1,15 s bzw. 1,20 s) ist um den gleichen Zeitbetrag versetzt. Weiterhin ist in dieser Darstellung der abweichende Kraftbedarf durch die wechselnde Schmelzeviskosität zu erkennen. Der Drucksprung

bleibt jedoch auch bei dem niedrigviskosen Material sichtbar, so dass eine automatisierte Steigungsüberwachung diesen mit ausreichender Genauigkeit erfassen kann.

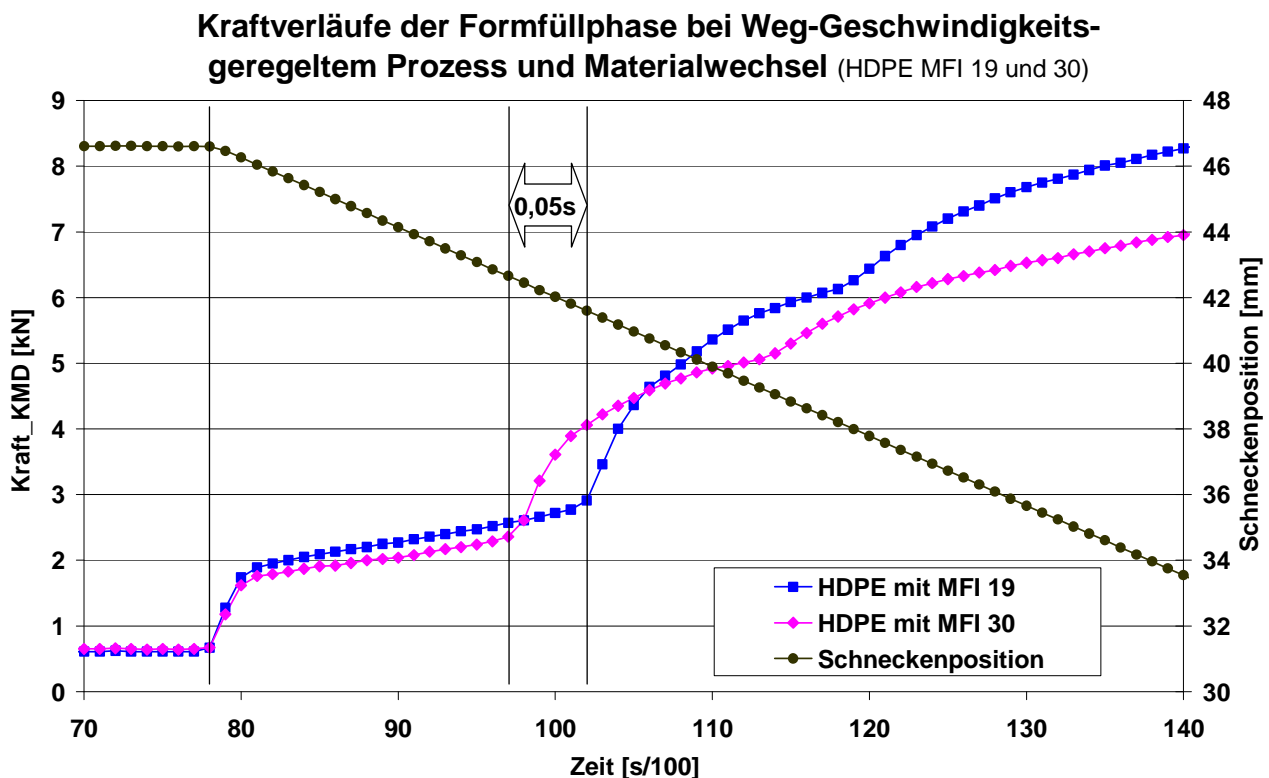


Abbildung 4-17: Kraftverläufe der Formfüllphase bei Weg-Geschwindigkeitsgeregeltem Prozess und Materialwechsel (HDPE mit MFI 19 und 30)

Um die durch das Schließverhalten der Rückströmsperre verursachten Schwankungen auszugleichen, sollte nach der erkannten Schließposition ein definierter Resthub zurückgelegt werden. So kann bei jedem Zyklus, unabhängig vom Schließzeitpunkt der Rückströmsperre, eine identische Menge an Schmelze verdrängt werden.

Bei den in Abbildung 4-17 dargestellten Kraftverläufen ergibt sich somit eine notwendige zeitliche Verschiebung des Einspritzprofils von 0,05 s. Dies entspricht bei der Versuchsmaschine und der eingestellten Einspritzgeschwindigkeit einer Verschiebung des Weg-Geschwindigkeitsprofils um 1,047 mm, wobei ein Volumen von 0,7391 ccm verdrängt wird.

4.5.2 Prognosemodellbasiertes Anpassen des Weg-Geschwindigkeitsprofils

In einem Standardspritzgießprozess kann wie in Kapitel 3.5 beschrieben, die aktuell produzierte Formteilqualität über ein Prognosemodell vorhergesagt werden und auf der Basis der Prognosewerte ein Eingriff in die Maschineneinstellung vorgenommen werden. Bei dem Standardprozess wurde im Rahmen dieser Arbeit die Nachdruckhöhe als Stellgröße zur Korrektur der Effekte durch Viskositätsveränderungen verwendet.

In einer Weg-Geschwindigkeitsgeregelten Einspritzphase ist der Druck eine Folgegröße des in der Schwindungsausgleichsphase realisierten Geschwindigkeitsprofils. Vorausgesetzt die Unterschiede im Schließverhalten der Rückströmsperre werden durch eine Ver-

schiebung des Formfüllhubes ausgeglichen, müssen in der Schwindungsausgleichphase nur die durch die variierenden Fließwiderstände verursachten Effekte am Formteil kompensiert werden. Da eine Implementierung einer Funktion zum automatischen Erkennen des Schließzeitpunktes der Rückströmsperre und entsprechender Anpassung des Weg-Geschwindigkeitsprofils im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich war, wird im Folgenden ein weiterer Ansatz dargestellt.

Dazu wird der Zusammenhang zwischen den Schmelzeigenschaften, dem Betriebsverhalten des Systems (insbesondere der Rückströmsperre) und der Formteilbildung in einem Prozessmodell abgebildet. In einer Versuchsreihe wird eine Viskositätsstörung durch einen Wechsel auf ein niedrigviskoseres Material erzeugt, wodurch das Formteilmgewicht ansteigt. Die wirkenden Effekte sind dabei ein schnelleres Schließen der Rückströmsperre und damit ein höheres Druckniveau in der Schwindungsausgleichphase sowie eine gesteigerte Druckübertragung aufgrund der besseren Fließfähigkeit der Schmelze. Der Zusammenhang wurde über ein multiples lineares Regressionsmodell abgebildet und die (nach dem Prozessmodell) notwendige Einspritzprofilkorrektur aus den Prozessdaten der Versuchsreihe im Nachhinein berechnet.

Abbildung 4-18 zeigt die im Verlauf der Versuchsreihe gemessenen sowie die über das Regressionsmodell berechneten Formteilmgewichte. Weiterhin sind die auf der Basis von Vorversuchen ermittelten notwendigen Korrekturen des Weg-Geschwindigkeitsprofils für einen Gewichtszielwert von 18,517 g mit angegeben.

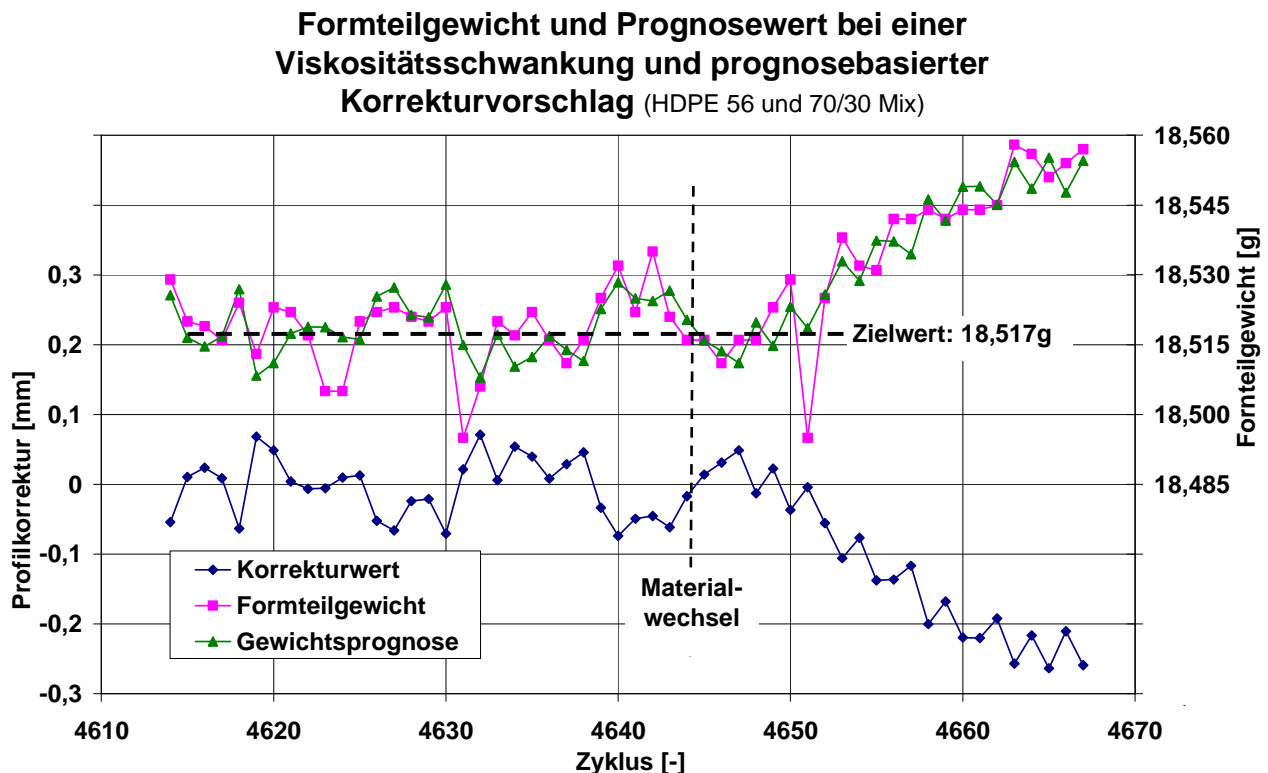


Abbildung 4-18: Formteilmgewicht bei Viskositätsschwankung und prognosebasierter Korrekturvorschlag (Material HDPE, MFI 22 und MFI 25)

Dabei wurden zur Berechnung der Gewichtsprognose nur solche Prozessparameter zur Modellbildung zugelassen, deren Berechnung vor dem Zeitpunkt des Übergangs in die Schwindungsausgleichsphase abgeschlossen ist. So basieren die Prognosewerte aus Abbildung 4-18 auf der Fließzahl und der Plastifizierarbeit des aktuellen bzw. des vorausgegangenen Zyklus. Eine Prozessregelung durch ein Adaptieren des Einspritzprofils innerhalb eines Produktionszyklus ist somit möglich. Die Gewichtsprognose des Prozessmodells erreicht hier ein Bestimmtheitsmaß von 79 %, Trendentwicklungen werden abgebildet, kurzfristige Variationen werden durch das Prozessmodell nicht erklärt. Über eine spezifische Anpassung von Prozessparametern an den Weg-Geschwindigkeitsgeregelten Prozess ließe sich aus jetziger Sicht eine deutliche Steigerung der Prognosegüten erreichen.

Vor dem Wechsel auf ein niedrigviskoseres Material in Zyklus 4644 schwanken die Korrekturwerte für die Profilverschiebung um Null, nach dem Wechsel werden negative Korrekturwerte vorgeschlagen. Ab Zyklus 4663 hat sich ein neues Niveau ausgebildet und der Korrekturwert pendelt um einen Mittelwert von -0,23 mm, d.h. um die Auswirkungen der Viskositätsänderung zu kompensieren, sollte das Einspritzprofil dauerhaft um diesen Wert verschoben werden.

Im Rahmen dieser Arbeit konnten diese Korrekturvarianten für einen Weg-Geschwindigkeitsgeregelten Einspritzprozess nicht detailliert untersucht werden. Es konnte jedoch nachgewiesen werden, dass das Schließverhalten der Rückströmsperre über die an einer standardmäßigen elektromechanischen Spritzgießmaschine vorhandene Sensorik in hoher Auflösung messbar ist. Diese Information ist als Eingangsgröße einer Regelung der Einspritzbewegung nutzbar.

Der Einfluss von Fließfähigkeitsunterschieden auf die Formteilbildung wird im Standard-spritzgießprozess durch die druckgeführte Nachdruckphase kompensiert. In einem Weg-Geschwindigkeitsgeregelten Prozess muss diese über eine aktive Kompensation erfolgen. Denkbar ist auch ein kombiniertes Verfahren aus Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Formfüllphase unter Berücksichtigung des Schließpunktes der Rückströmsperre und einer druckgeregelten Schwindungsausgleichsphase.

5 Fazit, Ausblick und Potenziale

Wie häufig, wenn es darum geht Bekanntes neu zu überdenken, sind verschiedenste Hindernisse zu überwinden. Dies war nicht anders als die ersten elektromechanischen Spritzgießmaschinen am Markt eingeführt wurden. Bis heute liegen die Marktanteile elektromechanischer Maschinen mit ca. 14% [VDMA] weit unterhalb der elektrohydraulischen Ausführungen, trotzdem kann man sagen, dass die „Elektrischen“ ihre Anwendungen gefunden haben. In vielen Fällen sind diese Anwendungen im Bereich der hochpräzisen technischen Formteile zu finden, bei denen höchste Reproduzierbarkeiten in den Maschinenfunktionen benötigt werden.

Neben den Vorteilen in der Wiederholgenauigkeit elektromechanischer Antriebe, bietet die Antriebstechnik standardmäßig Informationsquellen, die an elektrohydraulischen Maschinen nicht verfügbar sind. Dazu zählen die Frequenzumrichter, die die Servomotoren ansteuern und sämtliche elektrisch/mechanischen Ist-Werte der jeweiligen Achse enthalten. Diese Prozessinformation kann, bei entsprechender Auswertung, zur Steigerung der Prozessfähigkeit des Spritzgießprozesses eingesetzt werden. Durch eine gezielte Berechnung von energiebezogenen Prozessparametern, wie sie in Kapitel 3.2 beschrieben sind, können aussagekräftige Informationen über den aktuellen Verarbeitungszustand des Rohstoffes generiert werden. Dabei ist die Anwendung der Prozessparameter nicht ausschließlich auf die Einspritzbewegung zu beschränken, auch bei der Überwachung der Werkzeugbewegungs- und Auswerferachse kann eine gezielte Auswertung zur Prozessüberwachung genutzt werden. Ein Ansatz zur automatischen Auswertung der Prozessstendenzüberwachung ist in Kapitel 3.3 dargestellt und stellt einen ersten Schritt zur Verwertung der generierten Informationen dar. Wird eine Änderung im Prozess erkannt, könnte ein Warnsignal für den Maschinenbediener ausgelöst werden.

Neben einer alleinigen Auswertung der aus den Achsantrieben gewonnenen Prozesstrendinformation zu Dokumentations- oder Überwachungszwecken, ist in zukünftigen elektromechanischen Maschinen eine weitergehende Anwendung denkbar. Dazu ist allerdings ein grundsätzliches Umdenken in der Prozessführung des Spritzgießprozesses notwendig. Die Prozessführung des Standardspritzgießprozesses mit einer geschwindigkeitsgeregelten Formfüll- und einer druckgeregelten Nachdruckphase basiert nicht zuletzt auf den Möglichkeiten von elektrohydraulischen Maschinen. Wenn man über eine reine Umsetzung der Prozessführung von elektrohydraulischen Maschinen, wie sie heute Stand der Technik ist, hinaus denkt, sind verschiedene Varianten der Prozessführung möglich. Interessant ist z.B. eine auf der Basis von Prozessinformationen adaptierte ausschließlich Weg-Geschwindigkeitsgeregelte Einspritzphase. Dabei könnte z.B. über die Maschinensensorik der Schließzeitpunkt der Rückströmsperre erkannt und in die Regelung integriert werden. Über eine sensorische Erfassung des Schließzeitpunktes der Rückströmsperre könnten auch sehr temporär wirkende Viskositätsschwankungen, die sich aufgrund von nicht vollständig vollzogenen Spülprozessen nicht auf den Druckbedarf in der Formfüllphase auswirken, erkannt und ausgeregelt werden. Im Rahmen dieser Arbeit konnten die-

se Korrekturvarianten nicht detailliert untersucht werden. Es konnte jedoch nachgewiesen werden, dass das Schließverhalten der Rückströmsperre über die an einer standardmäßigen elektromechanischen Spritzgießmaschine vorhandene Sensorik in hoher Auflösung messbar ist.

Der Einfluss von Fließfähigkeitsunterschieden auf die Formteilbildung wird im Standard-spritzgießprozess durch die druckgeführte Nachdruckphase zu großen Teilen kompensiert. In einem Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Prozess müsste dies über eine aktive Adaption des Schneckenhubes erfolgen. Denkbar ist auch ein kombiniertes Verfahren aus Weg-Geschwindigkeitsgeregelter Formfüllphase, unter Berücksichtigung des Schließpunktes der Rückströmsperre und einer druckgeregelter Schwindungsausgleichsphase.

Im Hinblick auf die Entwicklungen an den weltweiten Energiemärkten wird ein weiterer Aspekt von energiebezogenen Prozessparametern interessant. So könnten die Prozessinformationen auch in einem Energiemanagement-System an Spritzgießmaschinen Verwendung finden, welches neben einer Visualisierung den gesamten Energiefluss in der Maschine optimiert. Zielsetzung eines solchen Energiemanagement-Systems kann z.B. eine aktive Vermeidung von Spitzenlasten sein, wodurch sich die Netzbelastung verringern ließe.

6 Zusammenfassung

Seit dem Beginn des Spritzgießmaschinenbaus konnten die mit den Maschinen erreichbaren Prozessfähigkeiten durch verbesserte Technologien stetig gesteigert werden. Der Einsatz von elektromechanischen Antrieben in Spritzgießmaschinen und den damit verbundenen möglichen Vorteilen in der Präzision der Maschinenbewegungen haben zu dieser Entwicklung ebenso beigetragen. In Zukunft wird eine weitere Steigerung der Reproduzierbarkeiten der Maschinenfunktionen nur noch bedingt zu einer Steigerung der Prozessfähigkeiten beitragen. Die Herausforderung liegt deshalb vielmehr darin rohstoffinduzierte Prozessstörungen, wie die Effekte von Rohstoffchargenwechseln oder wechselnden Restfeuchtigkeitsgehalten, an der Spritzgießmaschine zu erkennen und zu kompensieren. Eine sehr gute Basis vor diesem Hintergrund bietet die elektromechanische Antriebstechnik an Spritzgießmaschinen. So enthalten die Achsantriebe, bestehend aus Frequenzumrichter, Motor und Sensorik dezidierte Informationen zum Prozesszustand der jeweiligen Maschinenfunktionen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht wie die in den Achsantrieben verfügbaren Prozessinformationen zur Steigerung der Prozessfähigkeit eingesetzt werden können. Dazu werden in einem ersten Schritt für die verschiedenen Prozessphasen und Antriebsachsen Prozesskennzahlen definiert, die die Möglichkeiten der elektromechanischen Antriebstechnik nutzen. Da der Fokus hier auf der Beschreibung des Verarbeitungsverhaltens des Rohstoffes liegt, wird die Berechnung von Kennzahlen auf die Plastifizier- und Einspritzachsenantriebe beschränkt. Eine Übertragung der Kennzahlen auf weitere Maschinenachsen z.B. der Schließeinheit zwecks Zustandsüberwachung ist jedoch problemlos möglich.

In eingehenden Versuchsreihen wird anschließend die Reaktion der Kennzahlen auf eine simulierte Störung untersucht. Die Störung wird dabei über ein gezieltes Vorkonditionieren des Rohstoffes mit wechselnden Restfeuchtigkeitsgehalten in die Maschine eingebracht. Die Versuchsreihen zeigen bei allen verarbeiteten Polymertypen, dass die Parameter, die auf den dynamischen Phasen des Zyklus wie der Einspritz- und Plastifizierphase basieren, die höchsten Reaktionen auf die eingebrachten Störungen zeigen. Darüber hinaus ist ein großer Einfluss des Rohstofftyps festzustellen, reagieren bei dem verwendeten PBT annähernd alle betrachteten Prozessparameter deutlich auf die eingebrachte Störung, sind es bei dem verarbeiteten PA6 nur wenige. Ein Einfluss der Höhe der simulierten Störung auf die Reaktion der Kennzahlen ist ebenfalls nachweisbar.

Im Anschluss an die Versuchsreihen werden die Kennzahlen als Eingangsgrößen einer auf statistischen Prozessmodellen basierenden Qualitätsregelung verwendet. Eine über den Rohstoff eingebrachte Störung soll über die Kennzahlen erkannt und die Auswirkungen auf die Formteilqualität durch eine aktive Nachführung der Nachdruckhöhe kompensiert werden. Die in den Versuchsreihen erreichten Abweichungen zwischen Qualitätsprognose und Istwert liegen generell auf sehr niedrigem Niveau. Weiterhin ist in den Versuchsreihen eine Kompensation der Effekte der Störung auf die Formteilqualität durch eine Adaption den Nachdruckniveaus sehr gut möglich.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird ein neuartiger Ansatz zur Führung der Einspritzbewegung vorgestellt. Im Vergleich zum Standardspritzgießprozess mit einer geschwindigkeits- und einer druckgeregelten Formfüllphase wird bei der vorgestellten Prozessführung der Schneckenhub vollständig über ein Geschwindigkeitsprofil vorgegeben. Zur Generierung des Geschwindigkeitsprofils wird der Prozess in einem ersten Schritt in der Standardprozessführung eingerichtet, um dann aus dem Schneckenpositionsverlauf das notwendige Geschwindigkeitsprofil abzuleiten. Der Umschaltvorgang von der Geschwindigkeits- in eine Druckregelung, dessen regelungstechnische Ausführung im Standardspritzgießprozess als qualitätskritisch gilt, entfällt auf diese Weise.

Die Auswertung von gemessenen Schneckenpositionsverläufen zeigt leicht bessere Wiederholgenauigkeiten bei der geschwindigkeitsgeregelten Betriebsweise. Die Versuchsergebnisse verdeutlichen aber auch, dass stochastische Abweichungen im Schließverhalten der Rückströmsperre bei ausschließlich geschwindigkeitsgeregeltem Prozess deutliche Druckschwankungen in der Schwindungsausgleichsphase verursachen. Die in einem Dauerversuch gemessenen Gewichtsschwankungen sind folglich beim geschwindigkeitsgeregelten Prozess wesentlich höher.

Weiterhin werden die Auswirkungen einer rohstoffinduzierten Störung auf die Formteilqualität für beide Prozessführungsvarianten untersucht. In beiden Fällen führt die geänderte Schmelzeviskosität zu einem geänderten Schließverhalten der Rückströmsperre. Wird dieser Effekt im Standardspritzgießprozess teilweise durch die Nachdruckphase kompensiert, hat er bei ausschließlich geschwindigkeitsgeregelter Betriebsweise bedingt durch die Druckänderung in der Schwindungsausgleichsphase einen großen Effekt auf das Formteil.

Darauf aufbauend wird eine Möglichkeit beschrieben, über eine zyklusinterne Adaption des Geschwindigkeitsprofils die Effekte von wechselnden Schmelzeviskositäten zu kompensieren. In einem ersten Schritt wird dazu das Schließverhalten der Rückströmsperre über die Maschinensensorik erfasst und nach Erreichen des Schließpunktes ein definierter Schneckenhub absolviert. Auf diese Weise wird es möglich Abweichungen im Schließverhalten der Rückströmsperre aktiv zu kompensieren. Weiterhin können auch äußerst temporär wirkende Viskositätsstörungen, wie sie z.B. durch eine diskontinuierliche Zuführung von Regranulat verursacht werden, ausgeglichen werden. Die Versuchsreihen zeigen deutlich, dass die Änderung der Schmelzeviskosität das Schließverhalten der Rückströmsperre bereits beeinflusst, während druckbasierte Prozesskennzahlen (wie z.B. die Fließzahl) noch keine messbare Reaktion zeigen. Ausblickend wird vorgeschlagen die aus der Auswertung der zuvor beschriebenen Prozesskennzahlen gewonnenen Informationen über den Verarbeitungszustand des Rohstoffes bei der Adaption des Geschwindigkeitsprofils zu berücksichtigen, um so weitere Steigerungen der Prozessfähigkeit zu erreichen.

7 Summary

Since the beginning of injection moulding the achieved process capabilities could continuously be increased by the use of improved technologies. The introduction of electro mechanic drives technology with its benefits in the precision of the machines movements had

a share in this development. In the future a further improvement in the reproducibility will be suitable to only a limited extent in process capabilities. The challenge in fact will be to detect and compensate feedstock induced process disturbances like they are caused by batch variations or changes in the residual humidity within the machine. Electro mechanic drives deliver good qualifications against this background. The drive units consisting of frequency converter, electrical motor and the sensor system offer detailed information on the current process condition.

Within this thesis it will be investigated in what extend the available information in the drives system can be used to increase the processes capability. Therefore several process parameters for the different phases of the cycle are defined. These process parameters make use of the potential of electro mechanic drive systems. The focus here is to characterise the present feedstock quality for which reason the calculation of process parameters is here limited to the plasticising and injection drive. Transferring the method to further drives units, for example the clamp drive for the reason of condition monitoring is easily possible.

Subsequently detailed test series are carried out to investigate the parameters reactions on a simulated disturbance. The specific disturbance is thereby realized by processing preconditioned feedstock with a varying residual humidity contend. The process parameters that are based on the dynamic process phases like the injection an plasticizing phase show the highest reactions to the disturbance. Furthermore the type of polymer processed has a large influence on the height of the specific respond. An influence of the amplitude of the disturbance is also measureable.

After the test series the process parameters are used as input quantities to a statistically based quality control loop. A feedstock induced disturbance is to be detected by evaluation of the process parameter and the effect on the parts quality should further be compensated by an active adaption the holding pressure height. The achieved differences between the quality prediction and the actual values were on very low level. Within the test series it could be shown that it is possible to compensate the effects of the simulated disturbance by adapting the holding pressure height in a good way.

Furthermore in this thesis a new approach for controlling the injection movement is presented. Compared to the standard injection moulding process with its velocity- and pressure-controlled injection process the new process is completely specified by a velocity profile for the whole injection movement. In order to generate the velocity profile the process is set up in standard manner first, whereby the needed velocity profile is derived from the screw position signal. The change over process from velocity control to pressure control that is fundamental for the produced parts quality is no longer part of the process.

Evaluating the measured screw position data it can be seen that the solitary velocity controlled process has little advantages in its reproducibility. The results also show that stochastic deviations in the closing behaviour of the non-return valve cause rather high pressure variations in the phase of shrinkage compensation. That is also the reason why the

measured part weight variations within a long term test are much higher for the solitary velocity controlled process.

The effect of a feedstock induced process disturbance on the parts quality is also investigated for both process control approaches. In both cases the process disturbance results in a variation in the closing behaviour of the non-return valve. While this effect is partly compensated by the holding pressure phase in the standard injection moulding process it has a big influence on the resulting pressure level in the velocity controlled process and therefore has a high effect on the parts quality.

Based on this an auxiliary approach is presented where an in cycle adaption of the velocity profile is used to compensate the effects of variations in the melt viscosity. Therefore the closing position of the non-return valve is determined by monitoring the machines standard sensor equipment. After passing the closing position of the non-return valve a specific residual lift is covered, which permits to compensate variations in the closing position of the non-return valve. In addition this approach is capable of compensating short term viscosity defects like they are caused for example by discontinuous admixing of regrind material. The test series show clearly that changes in the melt viscosity have a prompt influence on the closing position of the non-return valve whereas the pressure based process parameters show no measureable reaction. Prospectively it is suggested to include the information on the current process condition gained by the evaluation of the previously described process parameters in order to raise the value of process capability even more.

8 Literaturverzeichnis

- [AB02] Albertson, A. / Brendel, M.: Investigation of injection moulding process robustness for various molding strategies. Society of Plastics Engineers, Antec-Proceedings, San Francisco (CA), USA, 2002
- [Ar97] Arburg NN.: Die Aufgabe bestimmt die Technik, Kundenzeitschrift der Arburg GmbH und Co KG, S.14, 06/1997
- [Ba08] Bader, C.: Und sie bewegt sich doch, Kunststoffe, S. 60-66, 6/2008
- [BE94] Bourdon R. / Ehrenstein G.W.: Zur Optimierung der Prozessrobustheit beim Spritzgießen. Qualität und Zuverlässigkeit 38, S.98-104, 1994
- [Bi94] Bichler, M.: Prozessparameter zur Qualitätssicherung auswählen und bewerten, S. 10, Kunststoffe 84, 10/1994
- [Bl96] Bluhm. R.: Verbesserte Temperaturkontrolle beim Kunststoffspritzgießen. Dissertation RWTH-Aachen, 1996
- [Bo82] Bongardt, W.: Verbesserte Prozessführung beim Spritzgießen von Thermoplasten. Dissertation RWTH-Aachen, 1982
- [Bo94] Bourdon, R.: Zur Optimierung der Prozessrobustheit beim Spritzgießen. Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg, 1994
- [BW07] Boss, M. / Wodke, T.: Kapillarrheometer perfektioniert Spritzgießprozess. Kunststoffe, S. 139-141, 11/2007
- [Ca05] Cavic, M.: Kontinuierliche Prozessüberwachung beim Spritzgießen unter Einbeziehung von Konzepten zur Verbesserung der Schmelzequalität. Dissertation RWTH-Aachen 2005
- [Ch02a] Chang, T.: Process capability comparison of various Switchover modes from the filling to packaging stages in injection moulding. Society of Plastics Engineers, Antec-Proceedings, San Francisco (CA), USA, 2002
- [Ch02b] Chang, T.: Robust process control in injection molding – process capability comparison for five switchover modes. Journal of injection molding technology, S.239-246, Society of Plastics Engineers, USA, 12/2002
- [De92] Devos, P. et al. New and autoadaptive process control on plastic injection moulding. Society of Plastics Engineers, Antec-Proceedings, Detroit (MI), USA, 1992
- [Do03] Doriat, C.: Eine philosophische Frage?. Kunststoffe, S.76-77, 10/2003
- [ED03] Edwards, R. / Diao, L. et al: A Comparison of Position, Cavity Pressure, and Ultrasound Sensors for Switch-Over Control in Injection Molding. Society of Plastics Engineers, Antec-Proceedings, Nashville (TN), USA, 2003
- [FKR88] Friesenbichler, W. / Knappe, W. / Rabitsch, R.: Injection moulding without packing, International Polymer Processing III, S.191-197, 1988

- [GBR01] Gornik, C. / Bleier, H. / Roth, W.: Arbeit an der Spitze, Kunststoffe, S. 60-66, 06/2001
- [Gi92] Gierth, M.: Methoden und Hilfsmittel zur prozessnahen Qualitätssicherung beim Spritzgießen von Thermoplasten. Dissertation RWTH-Aachen, 1992
- [GK83] Gissing, K. / Knappe, W.: Zum optimalen Nachdruckverlauf beim Spritzgießen thermoplastischer Kunststoffe, Kunststoffe 73, S. 241-245, 1983
- [GL83] Gissing, K. / Lampl, A.: Überwachung des Spritzgießprozesses durch Messung viskositätsbedingter Kennwerte, Plastverarbeiter 1983
- [Gr05] Gruber, J.M.: Prozessführung beim Thermoplastspritzgießen auf Basis des Werkzeuginnendrucks. Dissertation RWTH-Aachen, 2005
- [Ha04] Haman, S.: Prozessnahes Qualitätsmanagement bei Spritzgießen, Dissertation Universität TU-Chemnitz, 2004
- [Hä95] Häußler, J.: Eine Qualitätssicherungsstrategie für die Kunststoffverarbeitung auf der Basis künstlicher Neuronaler Netzwerke. Dissertation Universität Essen, 1994
- [He76] Hengesbach, H.: Verbesserung der Prozessführung beim Spritzgießen durch Prozessüberwachung. Dissertation RWTH-Aachen, 1976
- [He77] Hellmeyer, H.: Ein Beitrag zur Automatisierung des Spritzgießprozesses. Dissertation RWTH-Aachen, 1977
- [Hu75] Hunkar, D.B.: The interdependance of part parameters on process control adjustable functions in injection molding of thermoplastics. Society of Plastics Engineers, Antec-Proceedings, Atlanta (GA), USA, 1975
- [Hü85] Hüppe, R.: Sensoreinsatz zur direkten, kontinuierlichen Erfassung und Regelung von Produkteigenschaften beim Spritzgießen. Dissertation TU-Berlin, 1985
- [Ja08] Jarosch, P.: Zur Lebensdauerprognose zyklisch hoch belasteter Kugelgewindetriebe, Dissertation Universität Duisburg-Essen, 2008
- [JoMi02] Johannaber F. / Michaeli W.: Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag München-Wien, 2002
- [JoMi04] Johannaber F. / Michaeli W.: Handbuch Spritzgießen, Carl Hanser Verlag München-Wien, 2004
- [Ka02] Kerber, M.: Regelungsfunktionen mit künstlicher Intelligenz. Kunststoffe, S. 34-37, 12/2002
- [Ka06] Kamps T.: Einsatz von Synchron-Linearmotoren in der Spritzgießmaschinentechnik. Dissertation Universität Duisburg-Essen, 2006
- [KB95] Kamiske, G.F./ Brauer, J.P.: Qualitätsmanagement von A bis Z, Carl Hanser Verlag München-Wien, 1995
- [KF88] Koppelman, J. / Fleischmann, E.: Nachdruckfreies Spritzgießen von Polypropylen, Kunststoffe 78, S.312-315, 1988

- [KP98] Kazmer, D / Petrova, T.: Development of a Hybrid Neuronal Network for Quality Control of Injection Molding. Society of Plastics Engineers, Antec-Proceedings, Atlanta (GA) USA, 1998
- [Kr91] Kretzschmar, G.: Prozessoptimierung beim Elastomerspritzgießen mittels statistischer Modelle. Dissertation RWTH-Aachen, 1991
- [Ku97] Kudlik, N.: Reproduzierbarkeit der Kunststoff-Spritzgießprozesses. Dissertation RWTH-Aachen, 1997
- [KWN01] Kamps, T. / Wortberg, J. / Neumann, M.: Spritzgießtechnik für Schnellläufer, Verfahrens- und antriebstechnische Konzepte für die Herstellung dünnwandiger Artikel. Kunststoffe, S.44-50, 07/2001
- [La87] Langecker, G. : CT-Optimierung: wesentlicher Schritt in die Zukunft. Plastverarbeiter 38, S.190-194, 1987
- [La96] Lampl, A.: Mischgütekennzahl für Spritzgießmaschinen. Kunststoffe 86, S.1256-1260, 1996
- [Le85] Lemke, H.: Qualitätsabhängige Regelung und Überwachung des Spritzgießprozesses mittels Rechneinsatz. Dissertation TU-Berlin, 1985
- [LGP83] Lampl, A. / Gissing, K. / Painsith, H.: Kontrolle des Formfüllvorgangs beim Spritzgießen mit Hilfe der Einspritzarbeit. Plastverarbeiter 10, S.1105-1108, 1983
- [Ma85] Matzke, A.: Prozeßrechneinsatz beim Spritzgießen - Ein Beitrag zur Erhöhung der Flexibilität in der Fertigung. Dissertation RWTH-Aachen, 1985
- [Ma91] Mayer, S.: Gleichmäßige Rohstoffqualität –Voraussetzung für hochwertige Formteile, Fachtagung: „Qualitätsoptimierte Spritzgießtechnik“, Seminar Süddeutsches Kunststoff Zentrum SKZ Würzburg, 1991
- [MaRi07] Ma'moun A. / Rickey D.: Development of an extended predictive controller for injection speed, Society of Plastics Engineers, Antec-Proceedings, Cincinnati (OH), USA, 2007
- [Me74] Menges, G. / Stitz, S. / Hengesbach, H.: Analog arbeitende Prozessführungsgeräte für Spritzgießmaschinen. Plastverarbeiter 25, S.201-208, 1974
- [Me77] Menges, G. / Hellmeyer, H. / Lixfeld, H.: Regelung des Maximaldruckes im Spritzgießwerkzeug. Kunststoffe 67, S.184-188, 1977
- [MFS96] Michaeli, W. / Franke, M. / Schmidt, G.: Extrusions- Blasformen: Neuronale Netze zur Qualitätssicherung. Plastics-Special, S.34-37, 6/1996
- [MGS06] Michaeli, W. / Gruber, J. / Schreiber, A.: Automatische Regelung des Betriebspunktes auf Basis des Werkzeuginnendruckes, Beitrag zum 23. ikv-Kolloquium, Aachen, 2006
- [Mi96] Michaeli, W.: Optisches Umschalten – Prozessunabhängige Steuerung des Umschaltvorganges. Kunststoffe 86, S. 1030, 1996

- [MM08] Michaeli, W. / Mäsing, R.: Vergleich des Betriebsverhaltens elektrohydraulischer und elektrisch-mechanischer Antriebssysteme für Spritzgießmaschinen, Beitrag zum 24. ikv-Kolloquium, Aachen, 2008
- [MS08a] Michaeli, W. / Schreiber, A.: Online-Regelung des Spritzgießprozess auf Basis von Prozessgrößen, Beitrag zum 24. ikv-Kolloquium, Aachen, 2008
- [MS08b] Michaeli, W. / Schreiber, A.: Aller guten Dinge sind drei. Kunststoffe, S.59-63, 12/2008
- [MSL08] Michaeli, W. / Schreiber, A. / Lettowsky, C.: Optimierte Prozessführung beim Spritzgießen von Thermoplasten auf Basis von Prozessgrößen. Zeitschrift Kunststofftechnik (WAK), Carl Hanser Verlag München 2008, Nr. 1, S. 1 – 17, 2008
- [Mu00] Al-Haj Mustafa, M.: Modellbasierte Ansätze zur Qualitätsregelung bei Kunststoffspritzgießen. Dissertation Universität Essen, 2000
- [NN02] N.N.: Produktinformation Kistler Dataflow Analysesystem, Umdruck der Kistler Instrumente AG Winterthur, Schweiz, 2002
- [NoFu98] Hoi-Pang T. / Furong G.: A Fuzzy Logic Controller for Injection Ram Velocity. Society of Plastics Engineers, Antec-Proceedings, Atlanta (GA), USA, 1998
- [PA06] Patentschrift: Einspritzeinrichtung einer Spritzgießmaschine und Verfahren zu deren Betrieb. Deutsches Patent- und Markenamt, Patentnummer DE 10 2006 001 346 A1, 2006
- [PA86] Patentschrift: Verfahren und Vorrichtung zum geregelten Spritzgießen auf verschiedenen Kunststoffspritzgießmaschinen mit stets gleichen Formteileigenschaften und gleichen Maßen. Patentschrift DE3524310C1, 1986
- [PA90] Patentschrift: Verfahren zur Steuerung der Nachdruckphase beim Spritzgießen thermoplastischer Kunststoffe. Patentschrift DE3927995 A1, 1990
- [PJW95] Potente, H. / Jungmann, J. / Wenniges, T.: Process-concurrent Calculation of Moulded Part Properties, Journal of Polymer Engineering 15, S.221-241, 1995
- [Ri87] Ricketson, R. / Wang, K.: Injection molding process control based on Empirical Models. Society of Plastics Engineers, Antec-Proceedings, Los Angeles (CA), 1987
- [Rö79] Rörick, W.: Zur Praxis der Prozessregelung im Thermoplast Spritzgussbetrieb. Dissertation RWTH-Aachen, 1979
- [Ro86] Rothe, J.: Steuerung und Regelung an Spritzgießmaschinen. Kunststoffe 76, S.307-317, 1986
- [Sa79] Sarholz, R. et al. : Spritzgießen: Verahrensablauf, Verfahrensparameter, Prozesführung, 1979
- [SB01] Sheth, B. / Barry, C. et al: Improved part quality using cavity pressure switch-over. Society of Plastics Engineers, Antec-Proceedings, Dallas (TX), USA, 2001

- [SBK07] Schnerr, O. / Bürkle, E. / Klotz, B.: Der gläserne Innendruck – Qualitätsmaßstab für optische Teile. Kunststoffe, S.26-31, 5/2007
- [Sc06] Schreiber, A.: Optimierte Prozessführung durch Online-Regelung des Werkzeuginnendrucks, Beitrag zum Seminar: Qualitätssicherung beim Spritzgießen - Ausschuss senken, Gewinn steigern, S. 1-12, Aachen, 2006
- [Sc95] Schmidberger, E. / et al.: Neuronale Netzwerke beim Spritzgießen. Kunststoffe, S.620-626, 1995
- [Sc96] Schönborn, H.-H.: Start zum Schneckenspritzgießen, Kunststoffe, S.11, 01/1996
- [Se97] Seidel, F. / Brunner, D.: Prozessführung mit Staudruck und Schneckendrehzahl. Plastverarbeiter 48, S.26-29, 1997
- [Sm91] Smud, S., et al.: Advanced Process Control for injection moulding. Polymer Engineering and Science Journal, Bd. 31, S1081-1085, 1991
- [SSM92] Srinivasan, K. / Srinivasan, T. / Maul, G.P.: Part Weight Control in Thermoplastic Injection Molding Operations, Society of Plastics Engineers, Antec-Proceedings, Detroit (MI), USA, 1992
- [St73] Stitz, S.: Analyse der Formteilbildung beim Spritzgießen von Plastomeren als Grundlage für die Prozesssteuerung. Dissertation RWTH-Aachen 1973
- [St86] Steinbichler, G.: Der Spritzgießbetrieb im Wandel der Zeit. Swiss Plastics 9, S.47, 1986
- [StKe01] Stitz S. / Keller W.: Spritzgießtechnik Verarbeitung – Maschine – Peripherie. Carl Hanser GmbH & Co. KG, 2001
- [SW06] Steinbichler, G. / Wobbe, H.: Ein Schuss wie der andere? Kunststoffe, S.129-135, 09/2006
- [Ta02] Tabatabai, S.: Entwicklung und Analyse von Strategien zur prozesszeitkonformen Qualitätssicherung beim Thermoplast-Spritzgießen. Dissertation Universität Stuttgart, 2002
- [Ta87] Taguchi, G.: System of Experimental Design Vol. 1 and Vol. 2, American Supplier Institute, Dearborn, Michigan, 1987
- [TC91] Tachuchi, G. / Clausing, D.: System of Experimental Design, Engineering methods to optimize quality and minimize costs, Kraus International Publications, American Supplier Institute, Dearborn (MI), Vol. 1, 1991
- [Th06] Theiß, C.: Untersuchung zu Automation einer Spritzgießprüfkörperherstellung durch den Einsatz von Prozessmodellen, unveröffentlichte Diplomarbeit an der Universität Duisburg-Essen, 2006
- [Uj99] Ujma A.: Auswirkungen von Rohstoffchargenschwankungen auf den Spritzgießprozess und regelungstechnische Kompensationsstrategien. Dissertation Universität Paderborn, 1999

- [Va96] Vaculik, R.: Regelung der Formteilqualität bei Spritzgießen auf Basis statistischer Prozessmodelle. Dissertation RWTH-Aachen, 1996
- [Var74] Vargel, J.: Entwicklung eines Prozessmodells zur Adaptierung des Spritzgießprozesses. Dissertation RWTH Aachen, 1974
- [Wa00] Walter, A.: Methoden des Prozessnahen Qualitätsmanagements in der Kunststoffverarbeitung. Dissertation Universität-GH Essen, 2000
- [Wa91] Wang, P. / Wang, K.: Adaptive online process control of injection molding using PVT Model. Society of Plastics Engineers, Antec-Proceedings, Kanada, Montreal (QC), 1991
- [WH91] Wortberg, J. / Hanning, D.: SPC und Prozessüberwachung am Beispiel des Spritzgießprozesses, Kunststoffe 81, S. 965-971, 1991
- [WH92] Wortberg, J. / Häußler, J.: Moderne Konzepte der kontinuierlichen Prozessüberwachung. QZ 37, S. 98-104, 1992
- [WH94] Wortberg, J. / Häußler, J.: Qualitätsüberwachung mit adaptiven Prozessmodellen für die Kunststoffverarbeitung. Fachtagung „Polymerwerkstoffe 94“ Merseburg, S. 195-203, 1994
- [WJK04] Wortberg, J. / Jarosch, P. / Kamps, T.: Comparison of drive concepts on injection moulding machines under production conditions. Society of Plastics Engineers, Antec-Proceedings, USA, Chicago (IL), 2004
- [Wo89] Wortberg, J.: Qualitätssicherung beim Spritzgießen von Thermoplasten, QZ 34, S. 71-82, 1989
- [Wo89b] Wortberg, J.: Qualitätssicherung beim Spritzgießen von Thermoplasten, Kunststoffe 79, S.121, 1989
- [Wo96] Wortberg, J.: Qualitätssicherung in der Kunststoffverarbeitung, Carl Hanser Verlag München-Wien, 1996
- [Wo97] Wortberg, J.: Quality orientated Process Analysis. Society of Plastics Engineers, Antec-Proceedings, Kanada, Toronto (ON), 1997
- [WoSc03] Wortberg, J. / Schroer, T.: Mehr Effizienz beim Trocknen. Kunststoffe, S.149-154, 10/2003
- [WoSt07] Wobbe, H. / Steinbichler, J.: Total-Quality-Prinzip beim Spritzgießen immer wichtiger. Kunststoff-Berater, S.34-38, 01/2007
- [WWM97] Wortberg, J. / Walter, A. / Mustafa, M.: Prozessnahes Qualitätsmanagement. Kunststoffe 87, S.1664-1668, 1997
- [ZL04] Zhongbao, C. / Lih-Sheng, T.: Advances in Injection Molding Process/Quality Control. Society of Plastics Engineers, Antec-Proceedings USA, Chicago (IL), 2004

Eigene Veröffentlichung mit Bezug zu dieser Arbeit

- [KS05] Kamps, T. / Schiffers, R.: Energieaufnahme von Produktionszellen in der Kunststoffverarbeitung. Deutsche Kunststofftage 2005, Düsseldorf, 2005
- [Sc04] Schiffers, R.: Vor der Form. Kunststoffe, S. 108-114, 09/2004
- [Sc07a] Schiffers, R.: Anforderungsgerecht ausgelegt. Kunststoffe, S. 54-60, 09/2007
- [Sc07b] Schiffers, R.: Viele Verbesserungen im Detail. Kunststoffe, S. 49-54, 12/2007
- [WKS02] Wortberg, J. / Kamps T. / Schiffers R.: Antriebstechnik im Vergleich. Kunststoffe, S.28-32, 12/2002
- [WKS03] Wortberg, J. / Kamps T. / Schiffers R.: Reproduzierbarkeit und Kosten sind Hauptanliegen. Kunststoffe, S.62-69, 06/2003
- [WS05a] Wortberg, J. / Schiffers, R.: Model based 100% quality documentation system suitable for small lot sizes in injection molding. Society of Plastics Engineers, Antec-Proceedings, USA, Boston (MA), 2005
- [WS05b] Wortberg, J. / Schiffers, R.: Electric injection molding machine with new process technology and linear motor drives. Polymer Processing Society Jahrestagung, PPS-21, Leipzig, 2005
- [WS06] Wortberg, J. / Schiffers, R.: Online Quality Prediction in Injection Moulding Processes, Proceedings: IEEE 3rd International Conference on Mechatronics ICM 2006, Budapest, Ungarn, 2006
- [WS07] Wortberg, J. / Schiffers, R.: Condition monitoring and control for improved process capability in injection moulding. Polymer Processing Society Jahrestagung, PPS-23 Salvador, Brasilien, 2007
- [WS08] Wortberg, J. / Schiffers, R.: Entwicklungen bei elektromechanischen Spritzgießmaschinen, Antriebskonzepte–Maschinenfähigkeiten / Prozessfähigkeiten–Prozessdatenanalyse zur Beurteilung von Material-Streuungen, VDI Jahrestagung Spritzgießen, Baden-Baden, 2008
- [WSF08] Wortberg, J. / Schiffers, R. / Ferriere, C.: Identification of raw material condition by process monitoring and derived control strategies in injection moulding, Polymer Processing Society Jahrestagung, PPS-24 Salerno, Italien, 2008

Vom Autor betreute Diplomarbeiten mit Bezug zur dieser Arbeit

- | | |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Christoph Ferriere | Sammlung von Prozesswissen an einer Spritzgießmaschine zur Erkennung und Ausregelung von Chargenschwankungen im Rohmaterial.
Diplomarbeit, Universität Duisburg-Essen, 2007 |
| Dirk Moses | Untersuchung alternativer Regelungsstrategien zu Führung der Einspritzbewegung an Kunststoffspritzgießmaschinen.
Diplomarbeit, Universität Duisburg-Essen, 2009 |
| Frank Musielak | Untersuchung eines Ansatzes zur automatischen Kompensation von Chargen- und Feuchtigkeitsbedingten Qualitätsschwankungen beim Spritzgießen.
Diplomarbeit, Universität Duisburg Essen, 2008 |
| Kalojan-Rainer Röhr | Messtechnische Untersuchung und Auswertung der Energieströme in einer Spritzgießproduktionszelle.
Diplomarbeit, Universität Duisburg-Essen, 2005 |
| Christoph Theiß | Untersuchung zur Automation einer Spritzgießprüfkörperherstellung durch den Einsatz von Prozessmodellen.
Diplomarbeit, Universität Duisburg-Essen, 2006 |

9 Anhang

9.1 Versuchsmaterialien

PA6 Durethan B 30 S

Tabelle 9-1: Materialdaten Versuchsmaterial Durethan B 30 S

	Einheit	Wert
Dichte	g/cm ³	0,97
Wärmeleitfähigkeit	W/(m ² *K)	0,183
spezifische Wärmekapazität	J/(kg*K)	2390
Entformungstemperatur	°C	185
Werkzeugtemperatur	°C	40-80
Verarbeitungstemperatur	°C	250-290

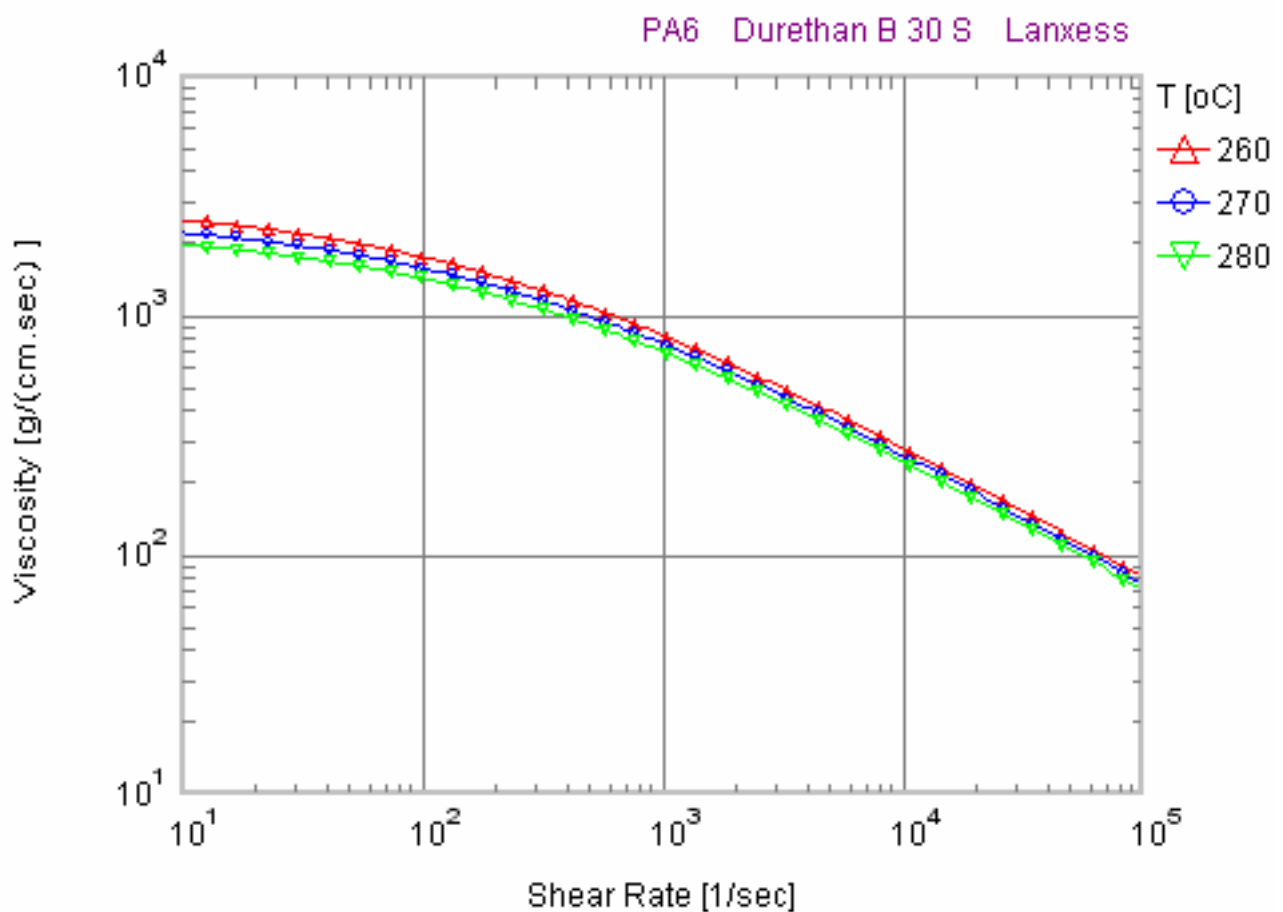


Abbildung 9-1: Viskosität aus Moldex3D für Durethan B 30 S

PA6 Durethan BKV 15

Tabelle 9-2: Materialdaten Versuchsmaterial Durethan B 30 S

	Einheit	Wert
Dichte	g/cm ³	1
Wärmeleitfähigkeit	W/(m ² *K)	0,197
spezifische Wärmekapazität	J/(kg*K)	2420
Entformungstemperatur	°C	185
Werkzeugtemperatur	°C	80-100
Verarbeitungstemperatur	°C	260-290

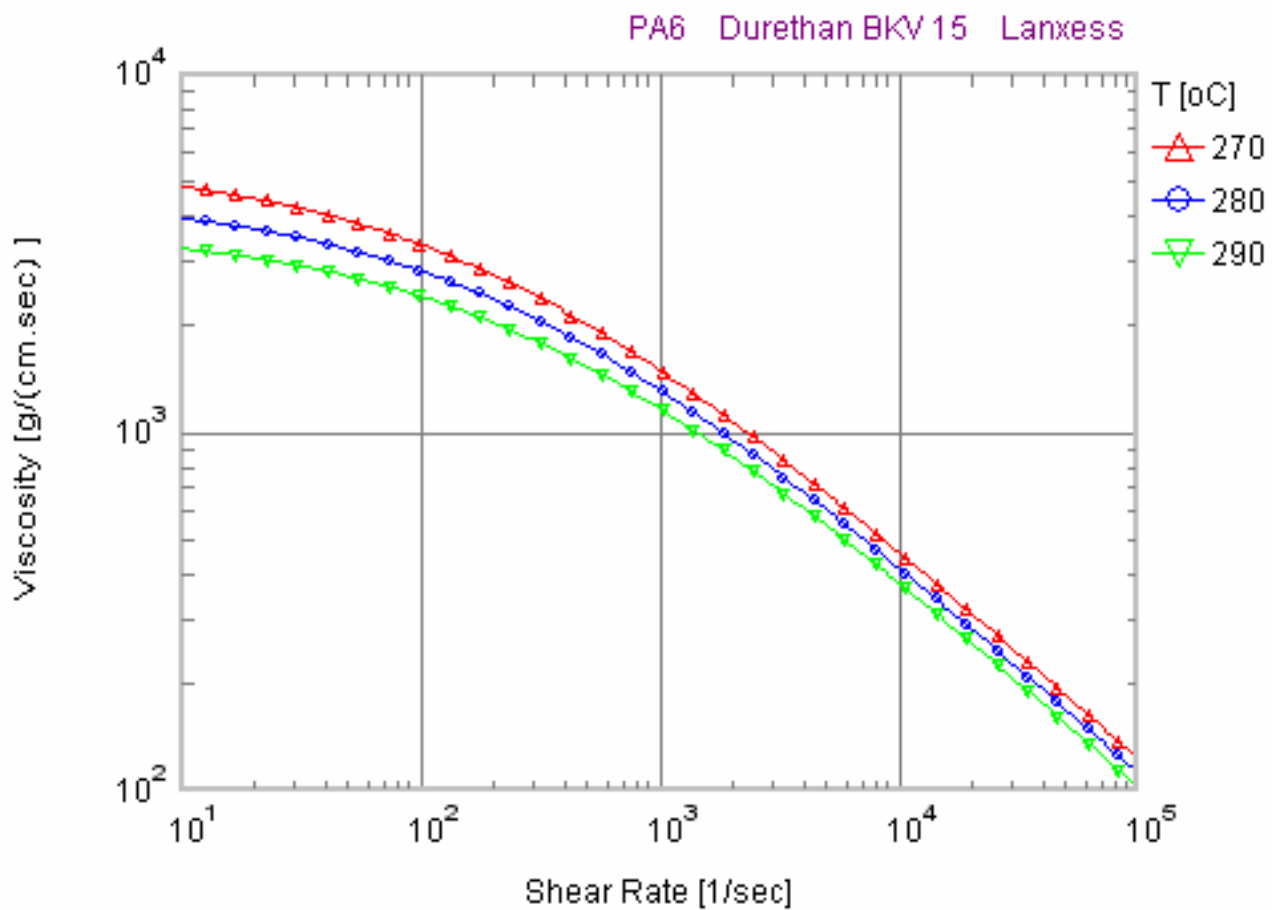


Abbildung 9-2: Viskosität aus Moldex3D für Durethan B 30 S

PBT Vestodur 2002 FR3

Tabelle 9-3: Materialdaten Versuchsmaterial Vestodur 2002 FR3

	Einheit	Wert
Dichte	g/cm ³	1,27
Wärmeleitfähigkeit	W/(m ² *K)	0,225
spezifische Wärmekapazität	J/(kg*K)	1764
Entformungstemperatur	°C	170
Werkzeugtemperatur	°C	50-120
Verarbeitungstemperatur	°C	260-320

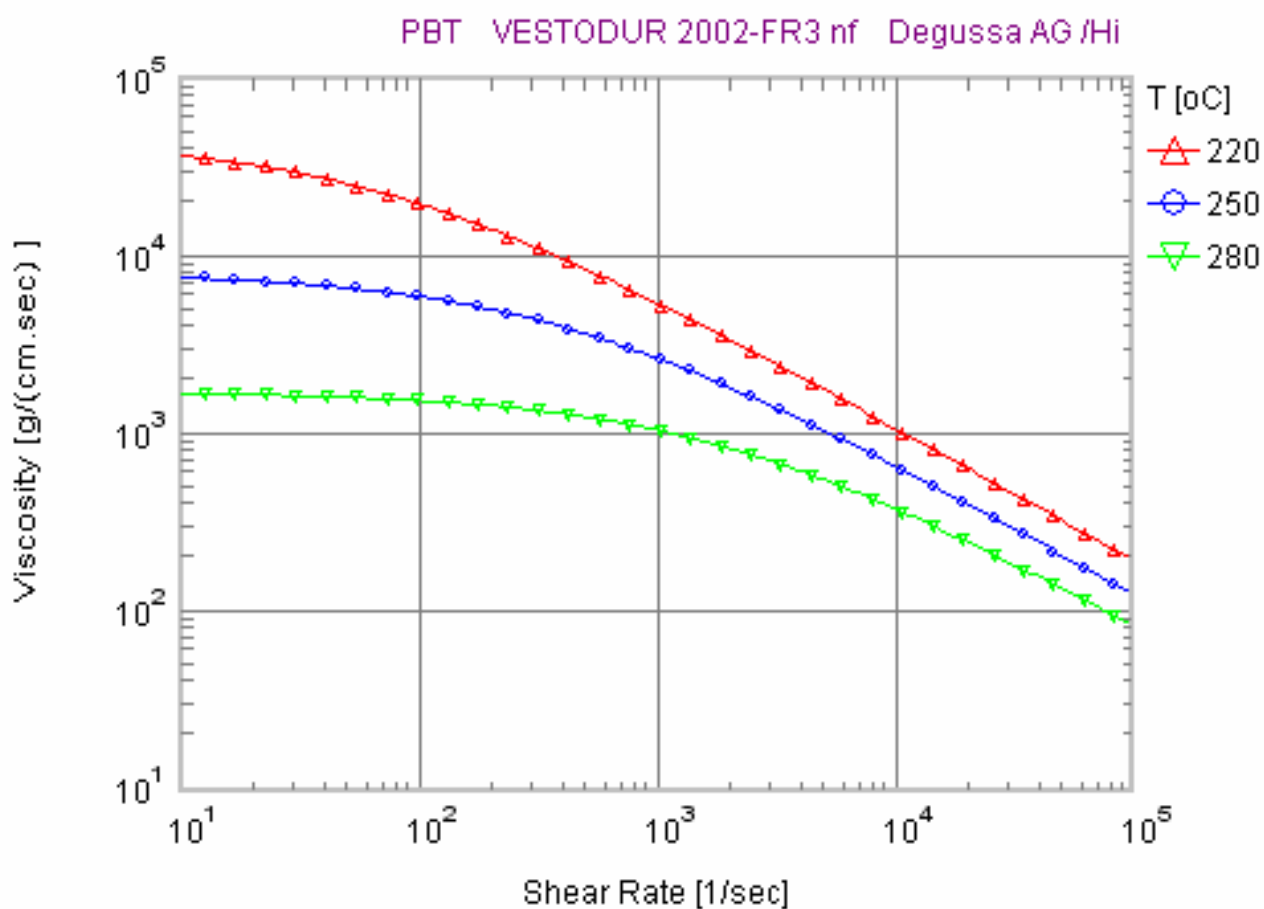


Abbildung 9-3: Viskosität aus Moldex3D für Vestodur 2002 FR3

HDPE Sabic M300054 / M200056

Tabelle 9-4: Materialdaten Versuchsmaterial Sabic M300054

	Einheit	Wert
Dichte	g/cm ³	0,954
Melt flow index (190°C/2,16kg)	g/10min	30
Werkzeugtemperatur	°C	15-60
Verarbeitungstemperatur	°C	175-230

Tabelle 9-5: Materialdaten Versuchsmaterial Sabic M200056

	Einheit	Wert
Dichte	g/cm ³	0,956
Melt flow index (190°C/2,16kg)	g/10min	20
Werkzeugtemperatur	°C	15-60
Verarbeitungstemperatur	°C	180-250

9.2 Formfüllstudie Farbmusterplatte

Zur Bewertung der Druckverläufe am Beginn der Einspritzphase wurde eine Füllstudie mit dem Werkzeug „Farbmusterplatte“ durchgeführt. Abbildung 9-4 zeigt die dabei gemessenen Druckverläufe der durchgeführten Füllgrade. In Abbildung 9-5 sind die den Druckverläufen entsprechenden Formteile abgebildet.

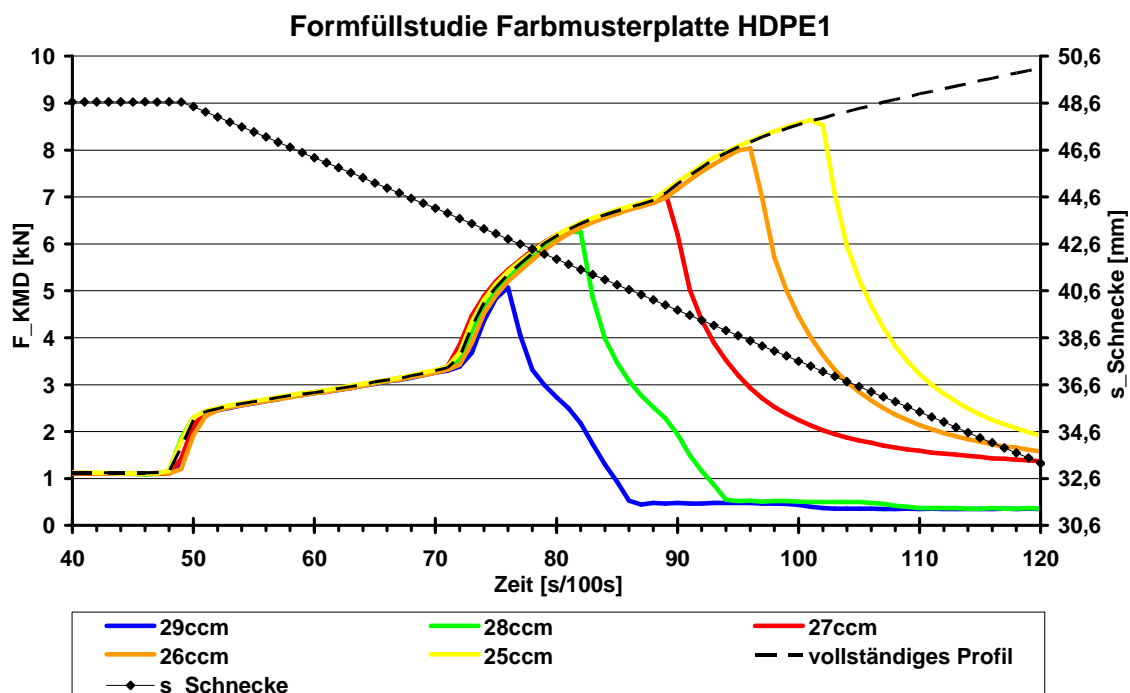


Abbildung 9-4: Druckverlauf an der Kraftmessdose und Schneckenposition der Füllstudie

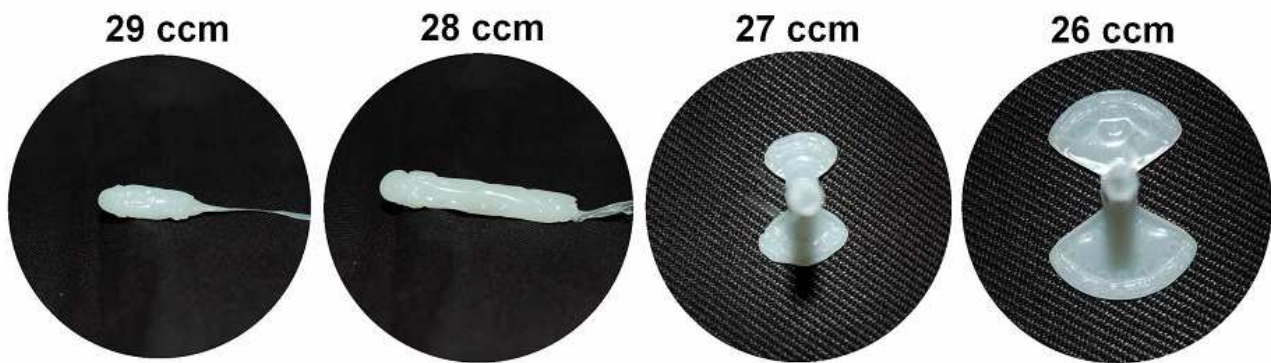


Abbildung 9-5: Formteile der Füllstudie zu den zuvor dargestellten Druckverläufen

9.3 Zusammenhang von Einspritzprofilverschiebung und Formteilgewicht

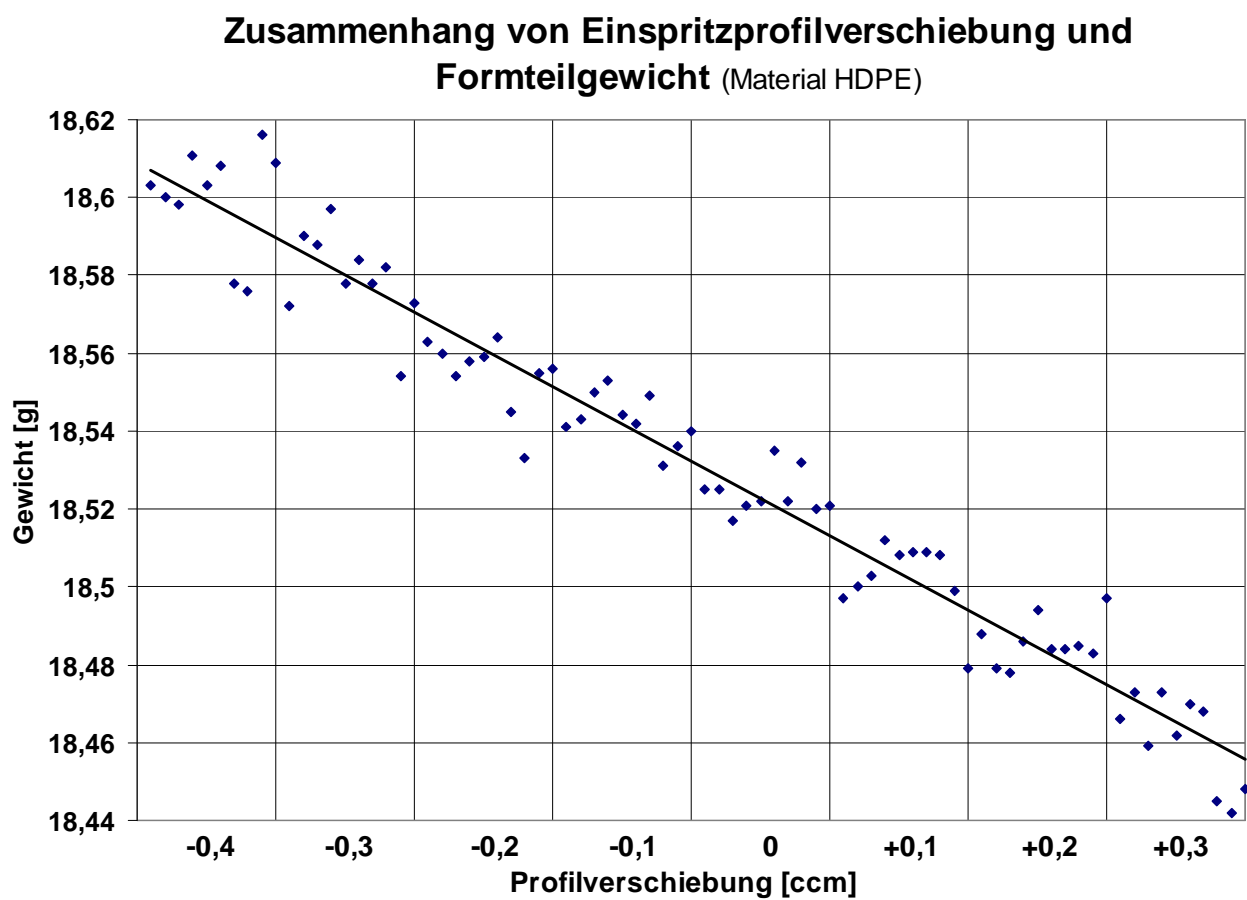


Abbildung 9-6: Zusammenhang von Einspritzprofilverschiebung und Formteilgewicht (Material HDPE)

9.4 Diagramme zur Reproduzierbarkeit der Schneckenbewegung

Die Darstellungen der Versuche 1 bis 3 sind in Kapitel 4.2 abgedruckt, die Versuchsreihen 4 bis 9 sind hier dargestellt.

Tabelle 9-6: Versuchsplan zur Reproduzierbarkeit der Schneckenbewegung

Standardspritzgießprozess							
	Drosselwiderstand	Einspritzgeschwindigkeit	$p_{\text{ein_max}}$ [bar]	dV/dt [ccm/s]	p_N [bar]	t_N [s]	V_{dos} [ccm]
1	-	+	~ 670	20	200	15	32
2	-	o	~ 535	10	200	15	32
3	-	-	~ 445	5	200	15	32
4	o	+	~ 800	20	200	15	32
5	o	o	~ 625	10	200	15	32
6	o	-	~ 500	5	200	15	32
7	+	+	~ 1000	20	200	10	32
8	+	o	~ 775	10	200	10	32
9	+	-	~ 615	5	200	10	32

Weg-Geschwindigkeitsprofil							
	Drosselwiderstand	Einspritzgeschwindigkeit	$p_{\text{ein_max}}$ [bar]	dV/dt [ccm/s]	p_N [bar]	t_N [s]	V_{dos} [ccm]
1	-	+	~ 670	Profil 1	~ 200	(15) 0	32
2	-	o	~ 535	Profil 2	~ 205	(15) 0	32
3	-	-	~ 445	Profil 3	~ 210	(15) 0	32
4	o	+	~ 800	Profil 4	~ 205	(15) 0	32
5	o	o	~ 625	Profil 5	~ 210	(15) 0	32
6	o	-	~ 505	Profil 6	~ 215	(15) 0	32
7	+	+	~ 980	Profil 7	~ 205	(10) 0	32
8	+	o	~ 775	Profil 8	~ 205	(10) 0	32
9	+	-	~ 620	Profil 9	~ 210	(10) 0	32

Variationskoeffizient der Schneckenposition bei Standardprozess und Weg-Geschwindigkeitsprofil (Versuch4, jeweils über 30 Zyklen ermittelt)

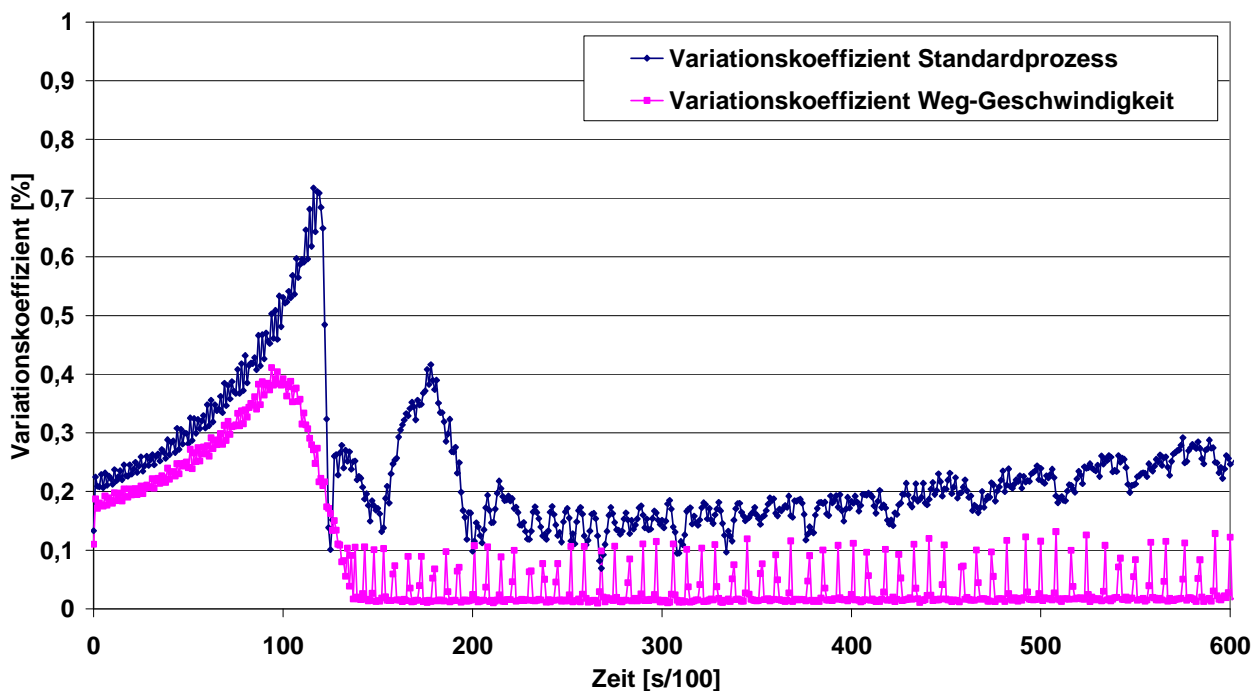


Abbildung 9-7: Variationskoeffizient der Schneckenposition bei Standardprozess und Weg-Geschwindigkeitsprofil (Versuch 4)

Variationskoeffizient der Schneckenposition bei Standardprozess und Weg-Geschwindigkeitsprofil (Versuch5 , jeweils über 30 Zyklen ermittelt)

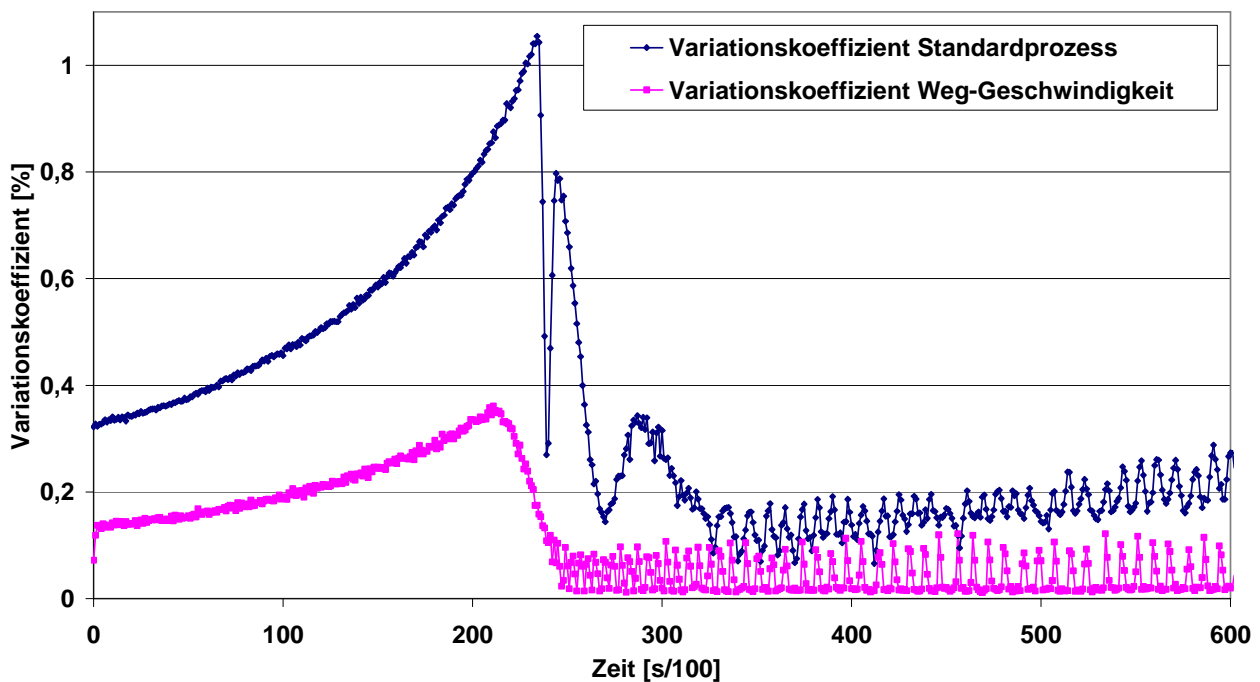


Abbildung 9-8: Variationskoeffizient der Schneckenposition bei Standardprozess und Weg-Geschwindigkeitsprofil (Versuch 5)

Variationskoeffizient der Schneckenposition bei Standardprozess und Weg-Geschwindigkeitsprofil (Versuch6, jeweils über 30 Zyklen ermittelt)

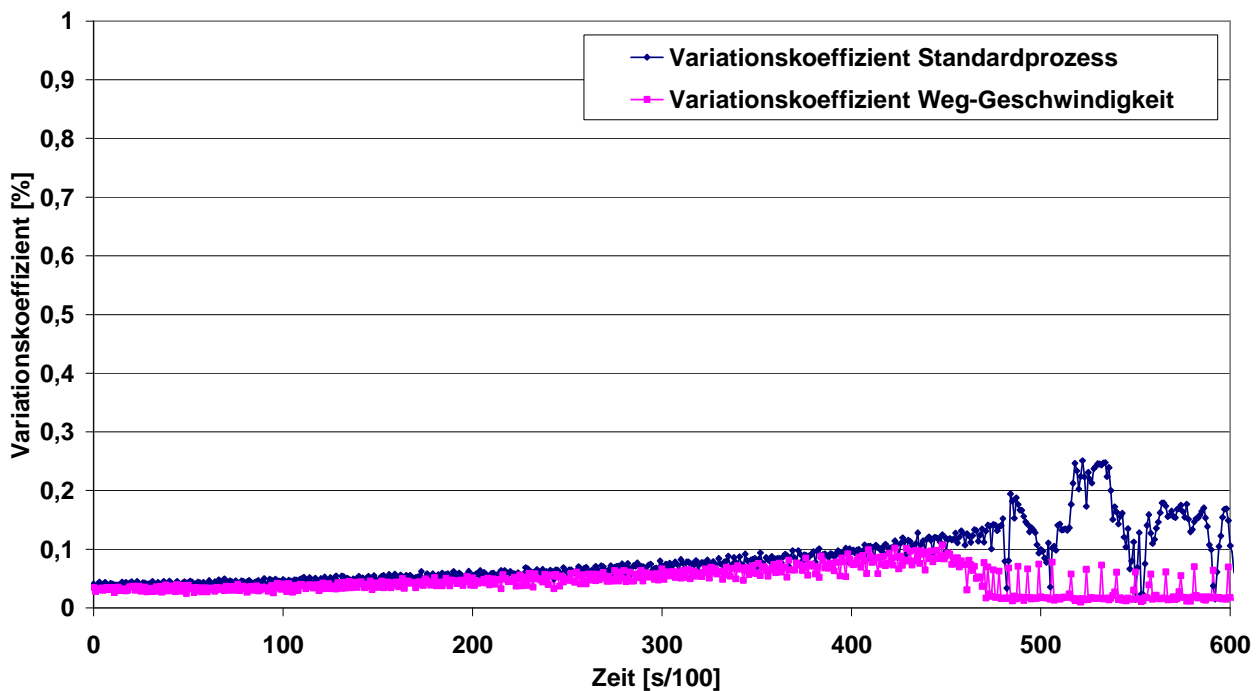


Abbildung 9-9: Variationskoeffizient der Schneckenposition bei Standardprozess und Weg-Geschwindigkeitsprofil (Versuch 6)

Variationskoeffizient der Schneckenposition bei Standardprozess und Weg-Geschwindigkeitsprofil (Versuch7, jeweils über 30 Zyklen ermittelt)

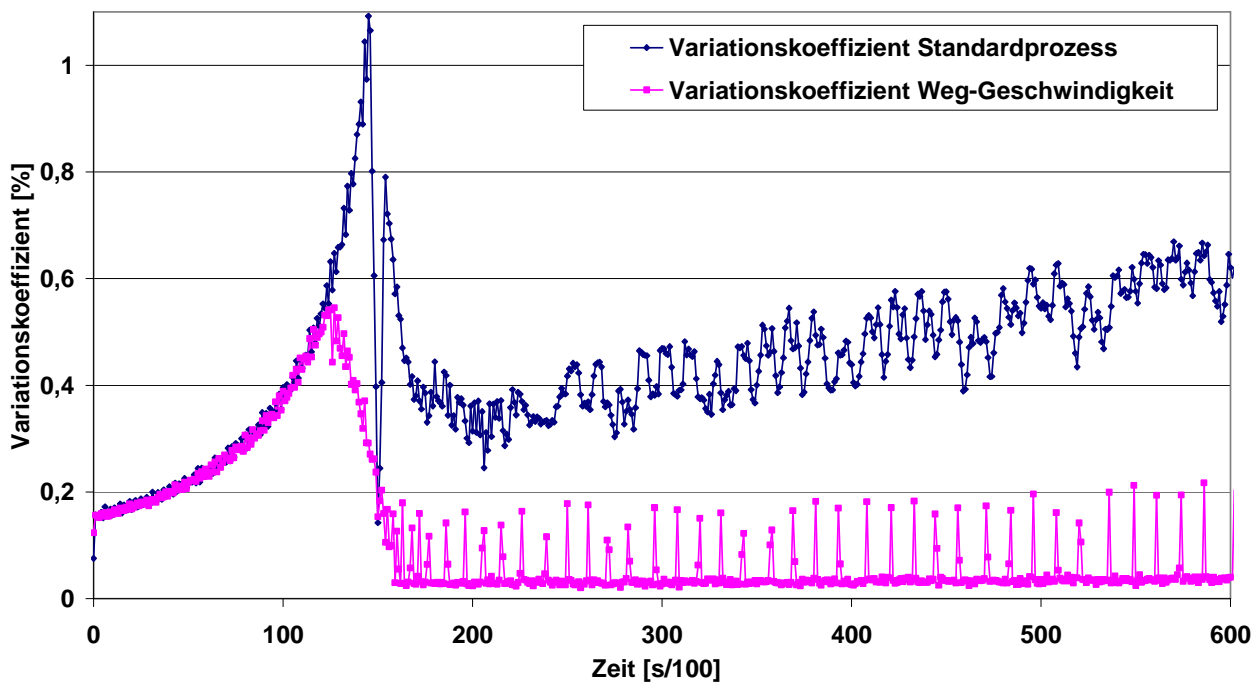


Abbildung 9-10: Variationskoeffizient der Schneckenposition bei Standardprozess und Weg-Geschwindigkeitsprofil (Versuch 7)

Variationskoeffizient der Schneckenposition bei Standardprozess und Weg-Geschwindigkeitsprofil (Versuch8, jeweils über 30 Zyklen ermittelt)

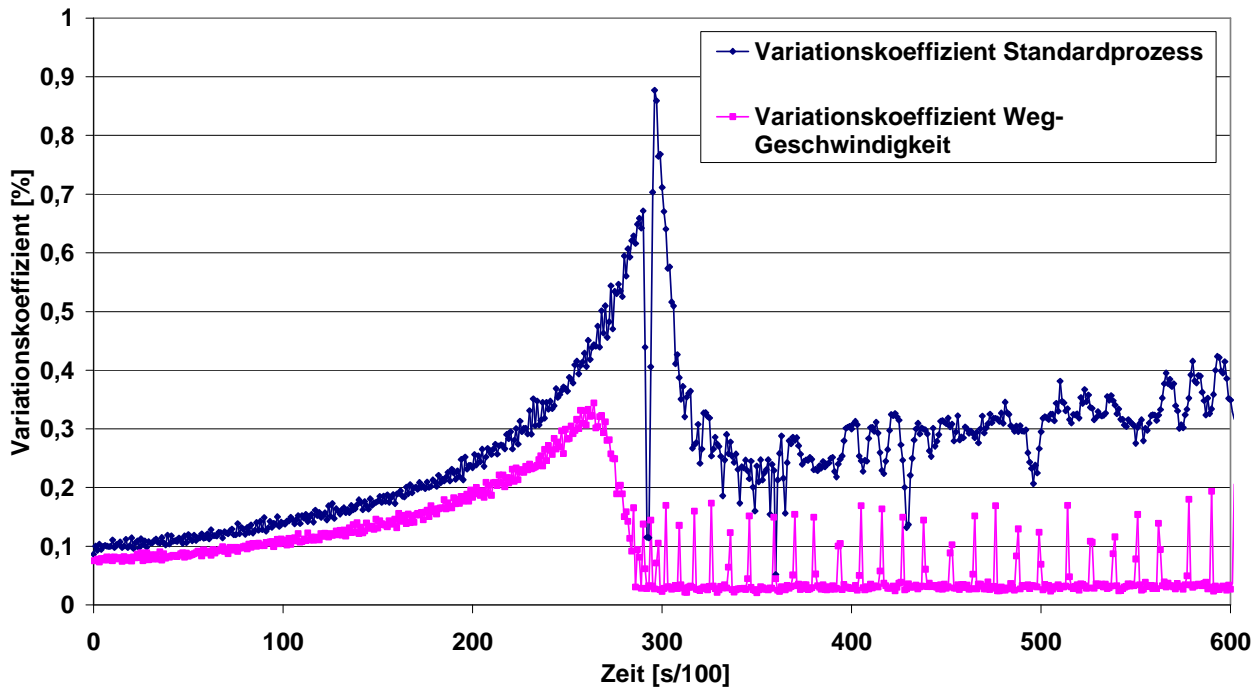


Abbildung 9-11: Variationskoeffizient der Schneckenposition bei Standardprozess und Weg-Geschwindigkeitsprofil (Versuch 8)

Variationskoeffizient der Schneckenposition bei Standardprozess und Weg-Geschwindigkeitsprofil (Versuch9, jeweils über 30 Zyklen ermittelt)

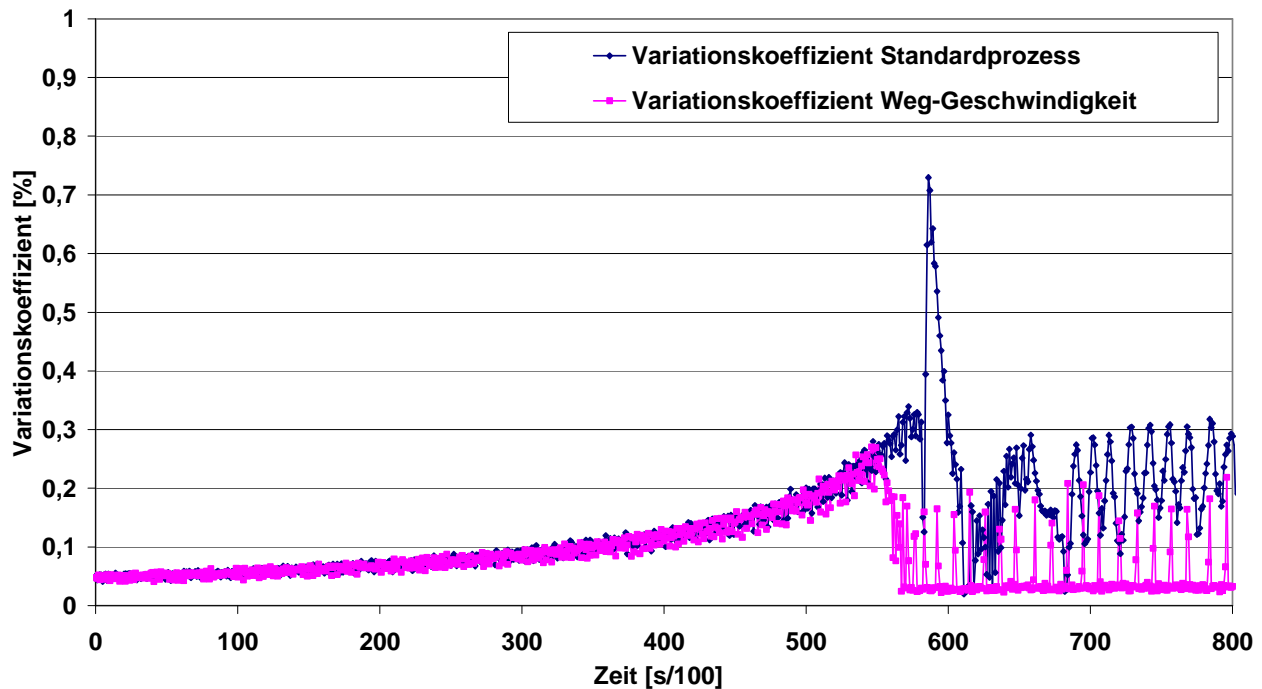


Abbildung 9-12: Variationskoeffizient der Schneckenposition bei Standardprozess und Weg-Geschwindigkeitsprofil (Versuch 9)

9.5 Verwendete Prozessparameter

Prozessparameter

EA_Düse	Einspritzarbeit Düse (Druck)
EA_KMD	Einspritzarbeit Kraftmessdose (Druck)
EA_Motor	Einspritzarbeit Motor (Drehmoment)
EA_Düse_SA	Einspritzarbeit im Schneckenabschnitt Düse (Druck)
EA_KMD_SA	Einspritzarbeit im Schneckenabschnitt Kraftmessdose (Druck)
EA_Motor_SA	Einspritzarbeit im Schneckenabschnitt Motor (Drehmoment)
F_Düse	Kraft Düse
F_KMD	Kraft Kraftmessdose
FA_Düse	Füllarbeit Düse (Druck)
FA_KMD	Füllarbeit Kraftmessdose (Druck)
FA_Motor	Füllarbeit Motor (Drehmoment)
Fließzahl Düse	Fließzahl Düse (Druck)
Fließzahl KMD	Fließzahl Kraftmessdose (Druck)

Fließzahl Motor	Fließzahl Motor (Drehmoment)
Int_Düse_E	Druckintegral Düse (Einspritzen)
Int_Düse_N	Druckintegral Düse (Nachdrücken)
Int_Düse_P	Druckintegral Düse (Plastifizieren)
Int_KMD_E	Druckintegral Kraftmessdose (Einspritzen)
Int_KMD_N	Druckintegral Kraftmessdose (Nachdrücken)
Int_KMD_P	Druckintegral Kraftmessdose (Plastifizieren)
Int_M_E	Drehmomentintegral (Einspritzen)
Int_M_N	Drehmomentintegral (Nachdrücken)
Int_Werkzeug_E	Druckintegral Werkzeug (Einspritzen)
Int_Werkzeug_N	Druckintegral Werkzeug (Nachdrücken)
M_E	Drehmoment (Einspritzen)
M_Mi_E	Drehmomentmittelwert Einspritzen (Einspritzantrieb)
M_Mi_N	Drehmomentmittelwert Nachdrücken (Einspritzantrieb)
M_Mi_P	Drehmomentmittelwert Plastifizieren (Plastifizierantrieb)
M_Mi_S	Drehmomentmittelwert Plastifizieren (Einspritzantrieb)
M_P	Drehmoment (Plastifizieren)
n_E	Drehzahl (Einspritzen)
n_P	Drehzahl (Plastifizieren)
NA_Düse	Nachdruckarbeit Düse (Druck)
NA_KMD	Nachdruckarbeit Kraftmessdose (Druck)
NA_Motor	Nachdruckarbeit Motor (Drehmoment)
PA I	Plastifizierarbeit
PA II	Plastifizierarbeit 2
p_Mi_Düse_E	Druckmittelwert Düse (Einspritzen)
p_Mi_Düse_N	Druckmittelwert Düse (Nachdrücken)
p_Mi_Düse_P	Druckmittelwert Düse (Plastifizieren)
p_Mi_KMD_E	Druckmittelwert Kraftmessdose (Einspritzen)
p_Mi_KMD_N	Druckmittelwert Kraftmessdose (Nachdrücken)
p_Mi_KMD_P	Druckmittelwert Kraftmessdose (Plastifizieren)
p_Werkzeug_max	Maximaler Werkzeuginnendruck
Restmassepolster	Restmassepolster
Staudruckarbeit	Staudruckarbeit (Einpritzantrieb)
S_Schnecke	Schneckenposition

t_E	Einspritzzeit
t_N	Nachdruckzeit
t_P	Plastifizierzeit
t_Z	Zykluszeit
T_Düse	Düsentemperatur
T_Material	Materialtemperatur
T_Traverse	Traversentemperatur
T_Werkzeug	Werkzeugtemperatur
T_Zone1	Temperatur Zone 1
T_Zone2	Temperatur Zone 2
T_Zone3	Temperatur Zone 3
T_Zone4	Temperatur Zone 4
U_Heizung	Anliegende Spannung an den Heizbändern
W_Gesamt	Gesamtenergieaufnahme der Heizbänder
W_Heizung Düse	Energieaufnahme Heizband Düse
W_Heizung 1	Energieaufnahme Heizband 1
W_Heizung 2	Energieaufnahme Heizband 2
W_Heizung 3	Energieaufnahme Heizband 3
W_Heizung 4	Energieaufnahme Heizband 4

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Reinhard Schiffers
geboren am: 05.09.1977 in Geilenkirchen
Familienstand: ledig
Staatsangehörigkeit: deutsch
E-Mail: reinhard.schiffers@alumni.uni-due.de

Schulausbildung:

Aug. 1984 – Jun. 1988 Grundschole in Geilenkirchen
Aug. 1988 – Jun. 1998 St. Ursula Gymnasium in Geilenkirchen. Abschluss: Abitur

Zivildienst

Jul. 1998 – Aug. 1999 Zivildienst St. Elisabeth-Krankenhaus Geilenkirchen

Hochschulausbildung

Okt. 1999 – Jun. 2003 Bachelor Maschinenbaustudium an der Universität Duisburg-Essen. Abschluss: Bachelor of Engineering
Okt. 2002 – Jun. 2004 Diplom Maschinenbaustudium an der Universität Duisburg-Essen, Abschluss: Diplom-Ingenieur
Okt. 2004 – Okt. 2009 Studium Wirtschaftsingenieurwesen an der Fernuniversität Hagen

Wissenschaftliche Tätigkeit

Jun. 2004 – Dez. 2008 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produkt Engineering an der Universität Duisburg-Essen

Berufliche Tätigkeit

seit Jan. 2009 Mitarbeiter in der Vorentwicklung der KraussMaffei Technologies GmbH in München